

分类号_____

密级_____

U D C _____

编号_____

中国科学院地球化学研究所

博士后研究工作报告

喀斯特退耕地自然恢复初期碳、水通量长期变化研究

报告人： 王彦伟

合作导师： 罗维均 研究员

工作起止日期： 2019年7月-2023年6月

报告提交日期： 2023年6月

中国科学院地球化学研究所

2023年6月

喀斯特退耕地自然恢复初期碳、水通量长期变化研究

Study on the long term changes of carbon and water fluxes during the early stage of natural restoration on abandoned farmland in karst region

博士后姓名： 王彦伟

合作导师： 罗维均 研究员

流动站（一级学科）名称：环境科学与工程

专业（二级学科）名称： 环境科学

研究工作起始时间：2019年7月12日

研究工作期满时间：2023年6月29日

中国科学院地球化学研究所

环境地球化学国家重点实验室

原创性声明

本人声明所呈交的博士后研究报告是在合作导师的指导下独立完成的。报告中取得的研究成果除加以标注的地方外，不包含其他人已经发表的研究成果，也不包含本人为获得其他学位而使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中进行了说明并表示谢意。本声明的法律后果由本人承担。

本人签字：王彦伟
2022)年6月21日

中国科学院博士后研究报告著作权使用声明

本人完全了解中国科学院地球化学研究所有关保留和使用博士后研究报告的规定。中国科学院地球化学研究所有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交该报告的纸质版和电子版，有权将该报告用于非盈利目的的少量复制并允许该报告进入本所图书部被查阅，有权将该报告的内容编入有关数据库进行检索，有权将博士后研究报告的标题和摘要汇编出版。保密的博士后研究报告在解密后适用本规定。

本研究报告适用于： 保密（ ） 非保密（）

纸质版在 五 年解密后适用于本授权书

电子版在 五 年解密后适用于本授权书

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：王彦伟 日期：2023年6月29日
导师签名：刘树均 日期：2023年6月29日

摘要

石漠化是制约我国西南喀斯特地区经济社会可持续发展最严重的生态地质环境问题，进入 21 世纪后，经过国家一系列生态工程的治理，已成功扭转了恶化的趋势，并且石漠化面积逐年下降，生态环境得到极大改善，使得该区域成为全球变绿最为显著的地区之一，其碳汇效应也引起了广泛关注。

本研究以普定喀斯特生态系统观测研究站退耕样地为观测研究对象，利用涡度相关法对其自然恢复过程中的碳、水通量进行长期连续观测，同时结合气候、植被和土壤辅助观测数据，试图量化喀斯特退耕地自然恢复初期生态系统固碳效应的大小及其主要贡献机制，以及植被恢复过程中蒸散发的变化特征及其主要控制因素，进而为区域生态恢复政策提供数据和理论支撑。经过长期观测研究，本研究主要得到以下几点认识：

1、退耕地自然恢复初期植被生物量呈现指数型增加趋势，并且在第 10 年达到人工林水平，且树种数超过 30 种，同时生物量潜力远高于人工林，证明自然恢复在生物多样性和碳汇角度优于人工林；

2、利用空间换时间法，发现退耕样地表层(0-10 cm)土壤有机碳相较未退耕地在 10 年间增加了 4%，该结果与土壤有机碳每年增加 4%以抵消全球碳排放的国际倡议一致，但深层(10-30 cm)土壤有机碳下降超过了 20%，表明喀斯特地区农田退耕初期土壤有机碳整体呈现下降趋势，可能与氮限制有关；

3、生态系统净碳交换呈现逐年增加的趋势，且高于亚热带森林平均碳通量，主要受生物量增加的控制，符合经典的生态系统演替理论，而受气候变化的影响较小。生态系统蒸散发年际变化主要受气候控制，为能量限制型。另外，利用 Budyko 范式，本研究证实当且仅当发生连续干旱时，生态系统蒸散发才会受到降雨量的影响而下降。

本研究结果为我国西南地区退化喀斯特生态系统在短期内自然恢复的可行性及其碳汇效应与水文效应提供了生态系统尺度的直接观测证据，也为更加准确的评估区域生态恢复碳汇大小提供了有效的地面验证数据。

关键词：喀斯特；退耕地；自然恢复；碳通量；蒸散发

Abstract

Rocky desertification is the most serious eco-geological environment problem that restricts the sustainable development in Southwest China karst region. After entering the 21st century, through a series of national ecological projects, the deterioration trend has been successfully reversed, and the area of rocky desertification has decreased year by year, and the ecological environment has been greatly improved, making this area become one of the most significant greening areas in the world. Its carbon sink effect has also attracted wide attention.

In this study, the converted farmland site in Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station was taken as the object of observation. The eddy covariance method was used to conduct long-term continuous observation of carbon and water fluxes during the process of natural restoration. At the same time, combined with the auxiliary observation data of climate, vegetation and soil, this study attempted to quantify the magnitude of the carbon sequestration as well as its main control mechanism during the early stage of natural restoration in karst area. And the interannual variation of evapotranspiration and its main control factors in the process of vegetation restoration. The final goal was to provide data and theoretical support for the follow-up regional ecological restoration policy. After long-term observation and research, this study mainly obtains the following understandings:

1. In the initial stage of natural restoration, the vegetation biomass of retired cultivated land showed an exponential increase trend, and reached the level of plantation in the 10th year, and the number of tree species exceeded 30. Meanwhile, the biomass potential was much higher than that of plantation, which proved that natural restoration was better than plantation in terms of biodiversity and carbon sink.

2. Using the space-for-time method, it was found that soil organic carbon in the surface layer (0-10 cm) of the returned plots increased by 4% in 10 years compared with that in the non-returned plots. This result was consistent with the international initiative of increasing soil organic carbon by 4‰ per year to offset global carbon

emissions, but the soil organic carbon in the deep layer (10-30 cm) decreased by more than 20%. The results indicated that soil organic carbon (SOC) showed a downward trend in the early stage of farmland conversion in the karst area, which may be related to nitrogen restriction.

3. The net carbon exchange of the ecosystem showed an increasing trend year by year, which was mainly controlled by the increase of biomass, which was in line with the classical theory of ecosystem succession, and was less affected by climate change. The interannual variation of ecosystem evapotranspiration is mainly controlled by climate and is energy-limited, that is, the actual evapotranspiration is less than the potential evapotranspiration, and the potential evapotranspiration is generally less than the rainfall, which is consistent with the results of previous studies. In addition, using the Budyko paradigm, this study confirmed that the evapotranspiration of the ecosystem would decrease under the influence of rainfall when and only when continuous drought occurred, which was related to the rainfall pattern under the control of the subtropical humid monsoon climate in this region. In the future, the increase of extreme rainfall and the decrease of effective rainfall might cause certain drought stress to the ecosystem.

The results of this study provide direct observation evidence at ecosystem scale for the feasibility of natural restoration and its carbon sink effect and hydrological effect on degraded karst ecosystems in southwest China in the short term, and also provide effective ground verification data for more accurate assessment of carbon sink effect of regional ecological restoration projects.

Key words: Karst; Abandoned farmland; Natural restoration; Carbon flux; Evapotranspiration

目录

摘要	I
Abstract	II
第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 我国“双碳”目标与陆地生态系统碳汇	1
1.1.2 贵州省石漠化治理与森林转型	5
1.2 科学问题	9
1.3 研究内容与方法	9
1.4 研究意义	12
第二章 研究进展	14
2.1 气候	14
2.2 植被	17
2.2.1 样地植被胸径变化	17
2.2.2 样地生物量变化	19
2.3 土壤剖面有机碳变化	20
2.4 碳通量变化	22
2.5 蒸散发变化	26
第三章 结论与展望	29
3.1 结论	29
3.2 展望	30
参考文献	32
致谢	40
作者简历及在学期间科研情况	41
附录 1: 2020 年普定站土壤有机碳调查数据	44
附录 2: 2020 年普定站样地植被调查数据	48
附录 3: 普定站通量与气象观测仪器信息	66

第一章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 我国“双碳”目标与陆地生态系统碳汇

减缓和适应气候变化是目前人类所面临的巨大挑战(Wang et al., 2023a), 虽然我国对于全球变暖的累积贡献远在发达国家之下, 但作为目前全球最大的碳排放国, 碳排放量约占全球的 30%, 减排压力巨大(Zheng et al., 2019)。为减缓全球气候变化, 我国政府承诺 2030 年前达到碳排放峰值, 2060 年前努力争取实现“碳中和”(王灿, 2020)。要实现以上目标, 在大力减排的同时, 对于部分不可避免的碳排放需要实施负排放技术来创造排放空间和降低减排成本(Fuhrman et al., 2020)。如图 1 所示, 研究表明我国陆地生态系统碳吸收大小及其未来变化对于实现国家“碳中和”目标有重要作用, 但其定量评估目前还存在很大的不确定性(杨元合 et al., 2022)。

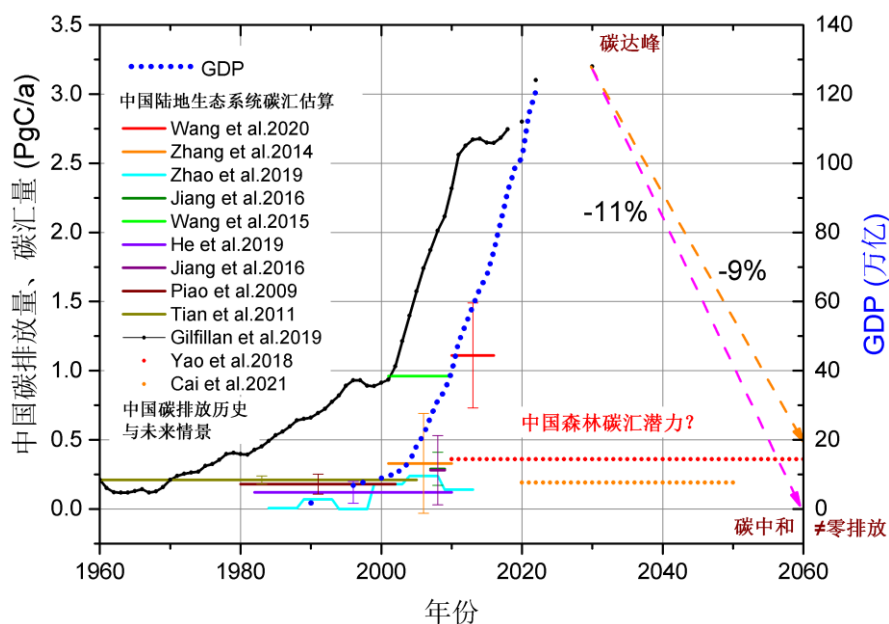


图 1 中国碳排放与陆地生态系统碳汇对比

Figure 1 Comparison of carbon emission with terrestrial carbon sink in China

比如刘毅研究团队最近在《自然》杂志上基于多站点大气 CO₂ 浓度观测反演得到 2010 至 2016 年平均中国陆地生态系统碳汇达 1.1 ± 0.38 PgC/a, 可抵消同期平均碳排放的 45%, 其中西南和东北林区贡献巨大(Wang et al., 2020)。而之前张丽研究团队基于遥感观测 CO₂ 浓度数据反演得到 2009 至 2010 年中国陆地生态系统碳汇仅为 0.21 PgC/a(Zhang et al., 2014a)。相比之下, 陈镜明研究团队基于大气反演法得到 2006 至 2009 年中国陆地生态系统平均碳汇为 0.35 PgC/a, 基于调查法得到平均碳汇为 0.33 PgC/a, 两者基本吻合(Jiang et al., 2016)。此前朴世龙研究团队在《自然》杂志上基于反演法得到 1980s 和 1990s 我国陆地生态系统碳汇为 0.26 PgC/a, 大约可抵消同期 33% 的碳排放量, 而基于植被调查法得到平均碳汇为 0.18 PgC/a(Piao et al., 2009)。田汉勤等基于模型法得到 1961 至 2005 年中国陆地生态系统碳汇平均为 0.18 PgC/a(Tian et al., 2011)。而何洪林等在《国家科学评论》上基于模型法得到 1982 至 2010 年中国陆地生态系统碳汇平均为 0.12 PgC/a, 并且呈现先减后增的趋势(He et al., 2019)。于贵瑞研究团队利用中国通量网观测数据结合遥感数据和模型方法得到 2001 至 2010 年中国陆地生态系统碳汇潜力为 0.97 PgC/a, 但由于人为活动扰动, 实际碳汇仅为 0.41 PgC/a, 说明我国陆地生态系统还有较大的增汇潜力(Wang et al., 2015)。另外, 于贵瑞等在《美国科学院院刊》上的研究表明 2001 至 2010 年我国六大生态恢复工程区的碳汇达 0.13 PgC/a, 对于减缓全球气候变化有重要作用(Lu et al., 2018)。岳天祥研究团队基于全国植被调查结果显示 1977 至 2013 年森林生物量碳汇平均为 0.1 PgC/a, 其中西南地区生物量增加最为明显(Zhao et al., 2019)。另外不同研究表明未来我国森林碳汇潜力依然在 0.19-0.36 之间 PgC/a(Cai et al., 2021; Yao et al., 2018)。

综上所述, 陆地生态系统碳汇估算主要有“自上而下”和“自下而上”两种方法, 前者主要是利用大气观测数据和碳排放清单进行反演得到区域尺度碳汇, 后者主要是利用地面观测数据建立相关模型进行尺度上升得到区域尺度碳汇。不同学者采用同一方法不同数据源或不同方法其估算结果都有很大差异, 且一般“自上而下”法估算结果高于“自下而上”法估算结果, 说明我们对陆地生态系统碳汇的过程和机制还没有完全认识清楚。特别是近年来我国对森林植被的保护和恢复投入巨大, 使得我国陆地生态系统固碳能力得到显著提升, 但是目前其定量评估还存在很大的不确定性(Chen et al., 2021)。如何更加准确的评估森林恢复导致的碳汇大小及其未来变化对于国家实现“碳中和”计划意义重大(Feng et al., 2023), 而开

展基于过程的长期观测研究是该领域当前科学研究极为重要的方向之一。

其中我国西南喀斯特地区经过一系列生态恢复工程的治理, 植被恢复导致的地表变绿十分显著。岳跃民等研究证实我国南方喀斯特地区 1999 至 2017 年生长季植被覆盖度从 69% 增加至 81%, 是全球生物量增加最快的地区之一 (Brandt et al., 2018), 特别是云南、广西、贵州三省 2001 年至 2012 年地上生物量碳库年均增加达到 0.05 PgC/a (Tong et al., 2018)。刘毅等最近在《自然》杂志上的研究表明 2010 至 2016 年我国西南地区固碳量可达 0.35 PgC/a, 约占全国陆地碳汇的 1/3, 且主要集中在夏季生长期, 相较以往研究被严重低估 (Wang et al., 2020)。上述研究表明我国西南喀斯特地区植被恢复具有显著的碳汇效应, 其中植被生物量碳库的增加具有重要贡献, 但是只考虑植被生物量碳库的增加可能会导致区域碳汇的严重低估。

关于喀斯特地区植被恢复导致生物量碳库的增加已有众多研究, 比如黄宗胜等利用空间换时间的方法对茂兰退化喀斯特森林植被自然恢复过程的研究表明, 总体上植被生物量随恢复进程递增, 可以由草本时期的 8 t/ha 增加至顶级阶段的 167 t/ha, 平均固碳强度为 128 gCm⁻²a⁻¹ (黄宗胜等, 2015)。曾馥平等对中国西南地区 318 个森林样地的调查结果显示, 平均地上生物量为 134 t/ha, 平均地下生物量为 28 t/ha, 地上生物量随年龄增加而增加, 地下生物量随年龄先增加后减小 (Zhang et al., 2016)。宋同清等基于广西喀斯特地区 45 块样地的调查, 得到不同林龄喀斯特森林总碳储量为幼林龄 (86 t/ha) < 近熟林 (11186 t/ha) < 中龄林 (11286 t/ha) < 成熟林 (14986 t/ha) < 过熟林 (24486 t/ha), 可以发现 10 至 20 年的中龄林总碳储量已达到成熟林总碳储量的 74%, 说明喀斯特森林固碳能力在前 20 年内最为显著 (胡芳等, 2017)。倪健研究团队通过植被调查法得到普定天龙山次生林在 1950s 砍伐后恢复至今地上生物量约为 138 t/ha, 得到该次生林年均固碳强度约为 139 gCm⁻²a⁻¹ (Liu et al., 2016), 而利用皆伐法得到普定赵家田次顶级森林 (树龄为 60 年) 地上生物量为 123 t/ha, 与天龙山植被调查结果较为一致 (刘立斌等, 2020b)。植被恢复除了会导致其本身生物量碳库的增加之外, 也会对土壤碳库变化和岩溶碳汇产生积极影响。比如王克林研究团队对广西古周坡耕地和退耕地 (自然恢复) 的研究发现, 随着植被恢复和物种多样性的增加, 退耕地有机质含量会显著增加 (吴敏等, 2016), 并且自然恢复对于土壤有机碳增加而言优于人工恢复 (Hu et al., 2018), 经过 13 年的生态恢复, 香椿树种植和自然恢复分别可

使土壤有机碳含量升高 40% 和 50% (Xiao et al., 2017)。周运超等对贵州普定后寨河流域的调查研究也表明林地土壤有机碳含量远高于耕地, 说明植被恢复会导致土壤有机碳的增加(张珍明等, 2017)。而刘再华研究团队基于普定水-碳通量大型模拟试验场的研究发现喀斯特地区土地利用类型对碳酸盐岩风化耦合水生光合作用碳汇具有其有重要的调控作用, 随着植被恢复岩溶碳汇会显著增加, 主要与径流强度和土壤二氧化碳浓度的改变有关, 比如生物量较高的草地是裸土地岩溶碳通量的 1.8 倍, 达到 $17 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ (Liu et al., 2018; Zeng et al., 2017; Zeng et al., 2019)。

综上所述, 目前对于喀斯特地区碳循环相关问题已有大量研究, 但受研究方法限制, 大多数研究都是单独针对植被碳库变化、土壤碳库变化和岩溶碳汇过程进行专门研究, 研究结果相对独立, 缺乏生态系统尺度上的整体研究。然而喀斯特生态系统碳循环涉及水-岩-土-气-生的多要素多界面复杂过程(王世杰等, 2017), 其中有机与无机碳循环的相耦合以及生物与非生物过程的相关联等特征相对于其他陆地生态系统更为特殊(Ma et al., 2019), 使得喀斯特地区植被恢复导致的碳汇效应是多方面的, 需要从生态系统演变的整体角度来进行考虑和观测(Chen et al., 2023)。另外, 水循环与碳循环密切相关, 比如研究发现蒸散发变化趋势及其主要控制因素存在显著的空间异质性, 比如长江流域和湄公河流域主要受植被变绿影响而呈现增加趋势, 而密西西比流域受降雨下降影响呈现下降趋势(Hu and Mo, 2022)。

关于生态系统植被演替研究大多以“空间换时间”的方法为主, 在假定环境条件相近的情况下获取低分辨率(十年至百年尺度)的时间序列, 可以得到生态系统演替的整体规律, 但无法得到高分辨率(月至年尺度)的生态系统变化信息, 特别是对处于自然演替初期变化较快的生态系统功能和结构, 需要使用多种方法进行原位的长期连续观测(Nandal et al., 2023)。

1.1.2 贵州省石漠化治理与森林转型

我国西南喀斯特地区生态脆弱，受人口、政策影响，自清代中期出现石漠化(韩昭庆, 2015)。石漠化作为岩溶区土地退化的极端形式，被称为“地球之癌”，与我国北方的沙漠化素有“南石北沙”之称，严重制约我国西南地区经济社会的可持续发展和生态文明建设(储小院 et al., 2020)。石漠化和贫困是“孪生兄弟”，过去一些石漠化特别严重的地方，一度陷入“无水可饮、无地可耕、无柴可烧”的境地，出现“一方水土养不活一方人”现象。对此，1994年袁道先院士牵头联名6位中国科学院院士向国务院提交了《关于西南岩溶山区科技脱贫的建议》(中国科学院地学部, 1994)，引起了国家的重视。“西南岩溶地区石漠化综合治理”被纳入我国“十五”计划纲要，纲要明确提出“加快小流域治理，减少水土流失，推进黔桂滇岩溶地区石漠化综合治理”，对全国石漠化综合治理起到了重要推动作用(袁道先, 2008)。石漠化作为制约我国西南地区可持续发展最严重的生态地质环境问题(王世杰, 2003)，经过一系列的生态恢复工程的治理，其恶化趋势已得到扭转，石漠化面积由最高时期的13万 km²下降到目前的7万 km²(余梦 et al., 2022)。其中贵州是石漠化面积最大的省份，伴随石漠化发展的转型，2005年左右也是贵州省人口、经济、环境协调发展的转折点，如图2和图3所示，人口、经济和政策驱动是转型发生的根本原因(安和平 et al., 2009)。

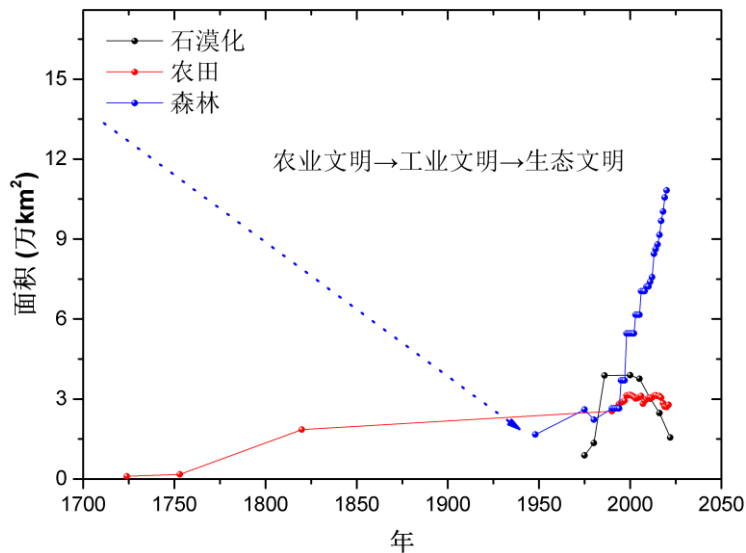


图2 贵州省主要土地利用变化历史

Figure 2 Main land use change history of Guizhou Province

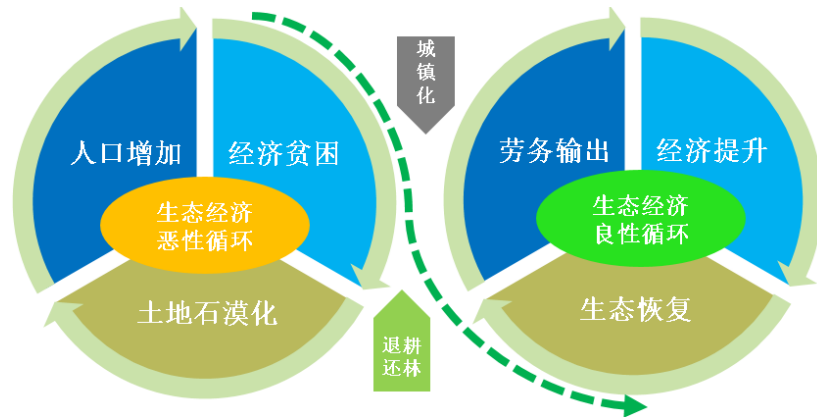


图3 贵州省人口-经济-生态转型

Figure 3 Population-economy-ecological relationship transition in Guizhou Province

在退耕还林政策支持下，我国 1999 年至 2013 年退耕还林面积达 9.3 万平方公里，荒山造林达 17.5 万平方公里，封山育林达 3.1 万平方公里，总投入达 4449 亿元。2014 年至 2018 年退耕还林面积达 3.3 万平方公里，其中包括 2.5 万平方公里的陡坡基本农田。贵州地处长江上游，2000 年开始启动退耕还林，2002 年在全省铺开，是全国较早实施退耕还林的省份，也是新一轮退耕还林还草工程实施规模最大的省份。2008 年以来，贵州连续实施以林草植被建设和保护、草食畜牧业发展、小型水利水保工程建设等为内容的石漠化综合治理工程。此外，还实施了天然林资源保护和珠江防护林体系建设等林业和生态建设重点工程。贵州省 15°至 25°产量相对较低的坡耕地约占耕作面积的 30%(Liang et al., 2020)。贵州已退耕 1.34 万 km² 坡耕地，新一轮退耕任务任有 1.13 万 km²，未来可退耕总面积 1.32 万 km²，包括 >25°陡坡耕地面积 0.82 万 km²，严重石漠化耕地 0.25 万 km²，严重污染耕地 0.22 万 km² (李海萍 et al., 2022)。如图 4 所示，利用贵州省历年国民经济和社会发展统计年鉴公报数据，统计得到过去 30 年贵州省植树造林和封山育林累积超过 14 万 km²。另外，贵州省 1984 至 2015 年 7 次森林资源清查数据表明超过一半的区域森林生物量呈现增加趋势，仅不到 10% 的区域呈现下降的趋势，目前以中低生物量类型为主，平均为 28 t/ha(Qian et al., 2021)。

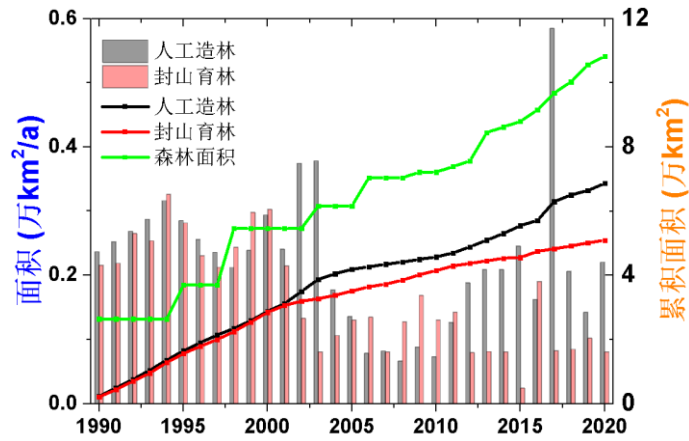


图 4 贵州省历年植树造林面积

Figure 4 Afforestation area of Guizhou Province over the years

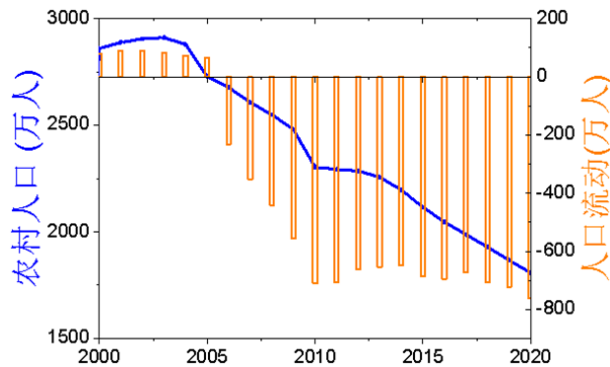


图 5 贵州省人口变化

Figure 5 Population change of Guizhou Province

森林和农田两种土地利用类型的相互转化受多种因素控制，其中农业集约化导致的产量提高有助于边缘农田的退耕，使森林的面积呈现长期的增加趋势 (Mather and Needle, 1998)。另外，木材短缺以及自然灾害的发生也会促使政府实施森林恢复政策，进而造成森林面积的短期增加，比如 1998 年长江流域发生特大洪灾，之后生态安全和国家投资成为中国森林转型的主要驱动力，同时我国出口型经济导致的人口迁移使得居民对森林产品的依赖下降也使得森林得以恢复 (Li et al., 2019)。如图 5 所示，贵州省农村人口进入 21 世纪后呈现下降趋势，务工流出人口达 700 万左右。随着经济社会发展，农村人口的迁移，自 1990 年开始中国超过 20 个省份出现山区农田弃耕现象 (Zhang et al., 2014b)。2001 至 2015 年期间我国贵州、广西喀斯特山区农田退耕比例约 10%，面积达 2.24 万平方公里 (Han and Song, 2019)。通过对我国 4850 农户的调查研究表明，山区农田退耕

使得有限的劳动力投入到未退耕优质土地的集约化管理之中,反而增加了土地的整体产出(Deng et al., 2021)。同时,撂荒地的复垦往往也会限制其已产生的生态环境效益(Crawford et al., 2022),所以建议对于恢复至中后期相较成熟的生态系统需要设置相应的保护政策,以充分发挥退耕地自然恢复对于缓解气候变化和保护生物多样性的积极贡献。

伴随农田弃耕之后的自然恢复是经济社会转型的一部分,也是生物多样性保护、减缓气候变化、提升生态系统服务功能的重要手段之一,同时也是粮食生产和森林保护协同关系的重要节点(Chazdon et al., 2020)。人口增加、城市化进程导致粮食需求增加,而退耕还林等生态恢复工程在一定程度上使得农田面积下降,往往导致内部粮食产量不能满足需求,完成 2030 可持续发展目标需要进行权衡(Qiu et al., 2022)。贵州省是我国粮食非主产区和产销平衡区,粮食产需正在由过去的紧平衡转为现在的输入性平衡(杨帅 and 唐彦, 2021),如图 6 所示,贵州省人均粮食占有量接近全球平均值,但在最近几年受农田耕作面积下降而降低。贵州省六种主要农作物单产平均为其潜力值的 73%,虽然通过灌溉和适当施肥仍有提升空间,但主要依靠跨区调粮解决城市和工业粮食缺口问题(Liang et al., 2021)。

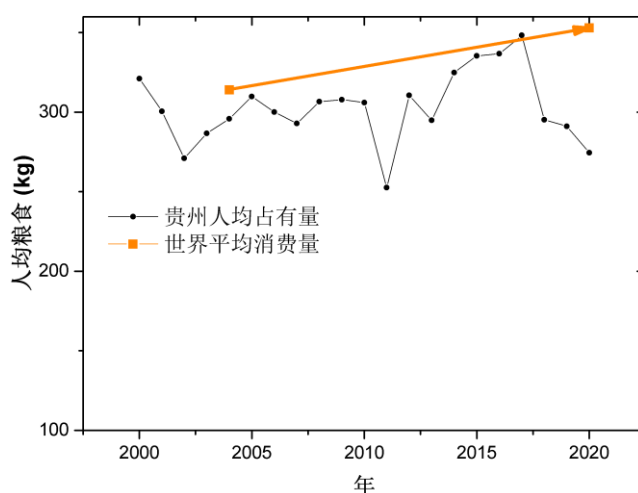


图 6 贵州省人均粮食占有量与世界平均粮食消费量对比

Figure 6 Comparison of grain per capita in Guizhou Province with the world average level

森林转型也与木材安全息息相关,2019 年我国木材对外依存度超过 50%,木材消费净进口依存度达 44%(柴梅 et al., 2022)。随着我国 2017 年实施天然林全面停伐以及国际环保政策的影响,国内木材供需缺口日益增大,使得木材安全

已经成为重大的资源战略问题(张涵雨 and 陶建军, 2021)。如图 7 所示, 以人均 0.4m^3 的木材消费量计算, 贵州省木材产量远远低于消费需求量, 林业产业的发展任重道远。退耕还林和森林保护政策在短期可能会限制木材生产, 但长期来看有助于森林资源的恢复, 进而提供可持续的森林产品。

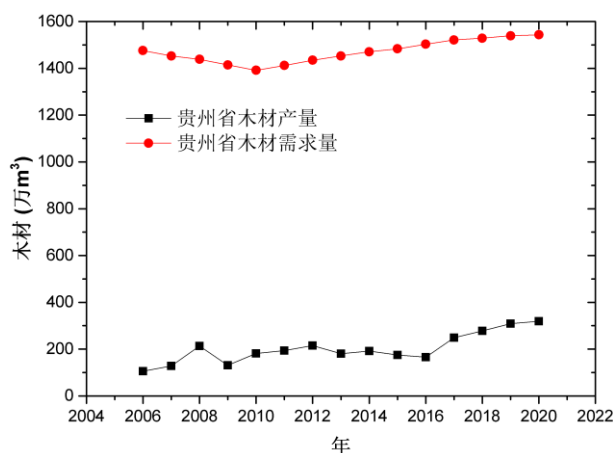


图 7 贵州省木材产量与需求对比

Figure 7 Comparison of wood supply and consumption in Guizhou Province

1.2 科学问题

本研究主要有两个科学问题:

- 1、我国西南喀斯特地区退耕地自然恢复初期生态系统固碳速率与未来碳库潜力, 以及受气候变化的影响?
- 2、我国西南喀斯特地区退耕地自然恢复初期生态系统蒸散发变化规律及其主要控制因素?

1.3 研究内容与方法

本研究依托普定喀斯特生态系统观测研究站(普定站), 聚焦喀斯特地区退耕地自然演替初期, 利用涡度相关法和植被、土壤调查法进行长期定位观测, 以定量刻画亚热带湿润季风气候条件下退耕地自然恢复过程中的植被、土壤和碳、水通量的协同变化情况。如图 9 所示, 研究地点普定站位于贵州省安顺市普定县城关镇陇嘎村, 距县城 5 km, 地理坐标为: $26^{\circ}36' \text{ N}$, $105^{\circ}79' \text{ E}$, 海拔 1170 m,

站区面积为 168 亩，于 2014 年加入中国生态研究网络（CERN）。普定站所在区域属于亚热带季风湿润气候，多年平均气温 15.96 °C，年降水量 1432 mm，年太阳辐射总量 4139 MJm⁻²，年日照时数 1046 h，≥0°C 的积温为 5828 °C，无霜期 340 d。站区所在地区植被以亚热带种类为主，主要有杉，次为松、楸、椿、白杨等。土壤类型以石灰土为主，质地为壤土，厚度不一。自然恢复样地位于普定站主站区内，样地于 2010 年退耕，退耕前为轮作玉米和油菜的旱地。如图 8 所示，观测期间样地处于自然恢复早期阶段，植被恢复明显，盖度高，可视为乔-灌-草生态系统，恢复区内次生林、灌丛、草地、裸岩面积占比约为 22%、44%、8%、21%。该样地地形局部陡峭，整体较为平缓，相对高差 10 m 左右，面积约 12 hm²。观测样地 2012 年生物量为 8 t/ha，2020 年生物量增加至 37 t/ha。



图 8 普定站退耕样地植被演替情况

Figure 8 Vegetation succession on abandoned farmland at Puding Station

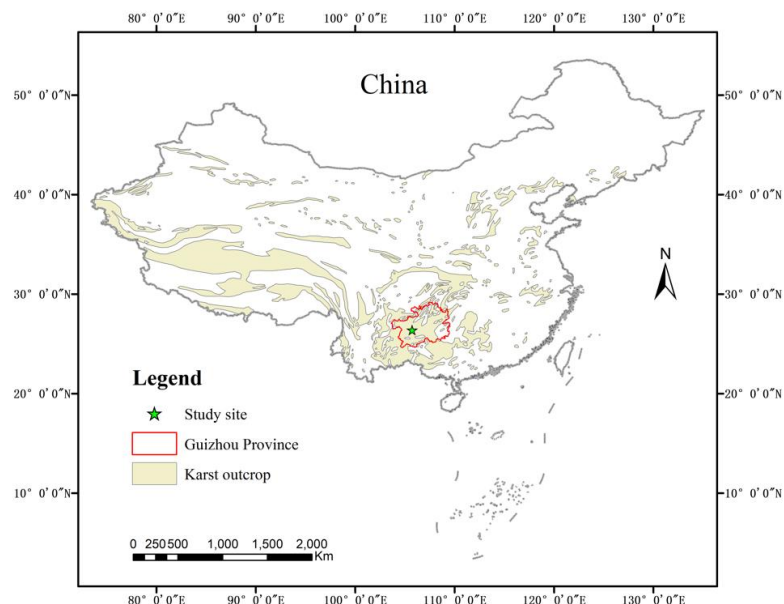


图 9 研究站点位置图

Figure 9 Location of the study site

本研究技术路线图如下所示：

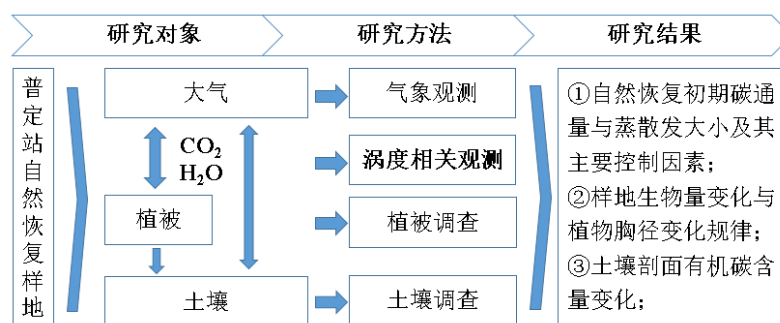


图 10 技术路线图

Figure 10 Flowchart of eddy covariance flux data processing for Puding Station

其中关键技术为涡度相关法，它是一种能直接观测地表与大气之间物质和能量交换的微气象学方法，自上世纪 90 年代以来被越来越多的应用于陆地生态系统碳循环研究，目前已有超过 30 年和上千个站点的应用历史，是当前世界通量网各研究站点使用的标准方法(Stoy et al., 2023)。涡度相关技术主要是通过测定垂直风速与 CO_2 密度的脉动，进行求协方差得到通量值。作为一种基于湍流理论的微气象学方法，其优点是原位、无扰动和连续长期在线观测。虽然本项目研究区下垫面较为复杂，但通过对观测数据进行质量控制和筛选，仍然可以得到大量可靠的观测结果。特别是通过与植被调查结果进行相互验证，可以保证研究结果的可信度。

普定站自然恢复样地涡度相关系统于 2015 年 3 月 15 日安装调试完毕并开始通量观测，系统主要设备由 Gill WindMaster 三维超声风速仪和 Li-7500A 红外气体分析仪以及 Biomet System 常规气象辅助观测系统组成，塔高为 24 m，超声风速仪、红外气体分析仪、空气温湿度、辐射均安装于 13.6 m 高处，土壤温湿度埋设于 10 cm、20 cm、40 cm 深处，土壤热通量埋设于 10 cm 深处。涡度相关原始数据采样频率为 10 Hz，通量平均时间为 30 分钟。开路涡度相关系统的原始数据由数据采集器自动记录和采集，频率为 10 Hz，气象数据来自普定站自动气象站，记录时间间隔 1 h。涡度相关原始数据通过 EddyPro 软件进行处理，主要包括异常值的剔除、去倾、坐标旋转、WPL 校正、谱分析、质量标记、足迹分析等，其中坐标旋转选用二次坐标旋转，后续数据处理主要通过 REddyProc 在线进行，包括夜间数据的筛选、缺失数据的插补以及数据拆分(Wutzler et al.,

2018)。由于气象站较通量塔数据连续性较好，故进行插补时选用气象站数据。具体步骤如下图所示。

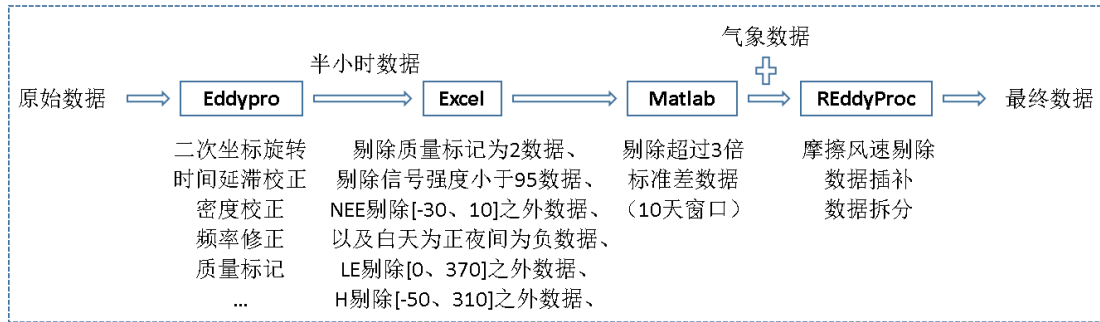


图 11 普定站涡度相关通量数据处理流程

Figure 11 Flowchart of eddy covariance flux data processing for Puding Station

1.4 研究意义

在区域尺度上，遥感证据表明我国西南喀斯特地区植被覆盖和生物量在显著增加，同时大气反演证据表明区域尺度碳汇被严重低估。基于涡度相关技术的长期碳通量观测可以在生态系统尺度上提供最直接的证据，从机理和过程上证明两者之间的联系，量化植被恢复所导致的碳汇效应大小和时间变化及其控制因素。目前我国森林资源清查研究表明 65% 的森林为中、幼年林(Zeng et al., 2015)，但是我国通量观测网络森林台站观测对象多为成熟林，仅会同站、小浪底站和千烟洲站观测的是年龄较小的人工林，而关于自然恢复初期的森林生态系统通量观测研究还相对空白(王绍强等, 2013)。

习近平主席在 2018 年 5 月 18 日至 19 日召开的全国生态环境保护大会上提出新时代推进生态文明建设必须坚持好 6 项原则，其中首要原则是坚持人与自然和谐共生，坚持节约优先、保护优先、自然恢复为主的方针。突出强调自然恢复为主，其主要原因是因为自然恢复相较人工植树造林有更高的性价比和更加多样的生态系统服务功能(Wang et al., 2023b)。

本研究针对我国西南喀斯特地区退耕地自然恢复初期碳水通量变化进行长期定位观测研究，对于验证区域生态恢复工程造成的碳汇效应和水文效应可以提供直接的观测证据。如下图所示，研究结果对于指导下一步生态恢复工程和石漠化治理以基于自然恢复的方式进行起到案例支撑的作用，同时也可以为我国西南

喀斯特地区固碳潜力的评估提供有效的基础数据。

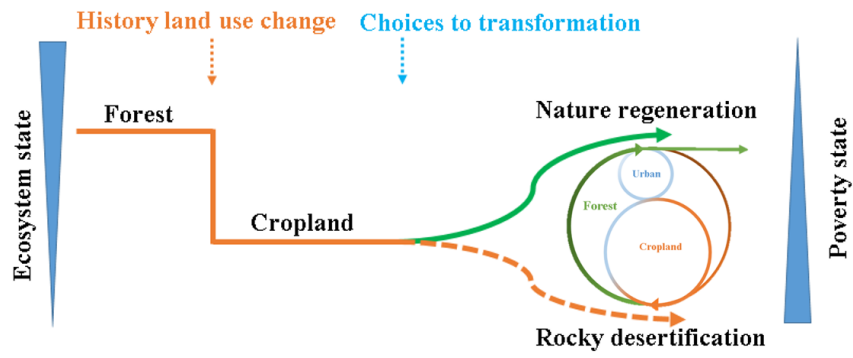


图 12 喀斯特地区土地利用变化情景

Figure 12 Land use change scenario in karst region

第二章 研究进展

2.1 气候

研究区受亚热带湿润季风气候控制，雨热同期，雨旱分明。如图 13 所示，以 2015 年至 2019 年为例，发现各风向所占比例基本一致，反映出季风气候年际之间的相似性。冬季主导风向为东北风，夏季主导风向为南风，不同风向占比季节变化如图 14 所示，可见风向随季风发展的变化过程。如图 15 所示，4 至 9 月偏南风主导，受印度洋和太平洋水汽输送贡献，降雨充沛，占全年降雨量超过 70%，故在本研究中定义为雨季，其他月份东北风和东风占据主导，定义为旱季。

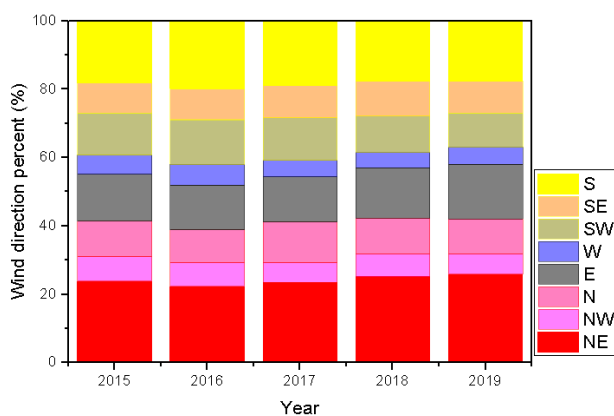


图 13 历年风向分布占比

Figure 13 Yearly wind direction distribution

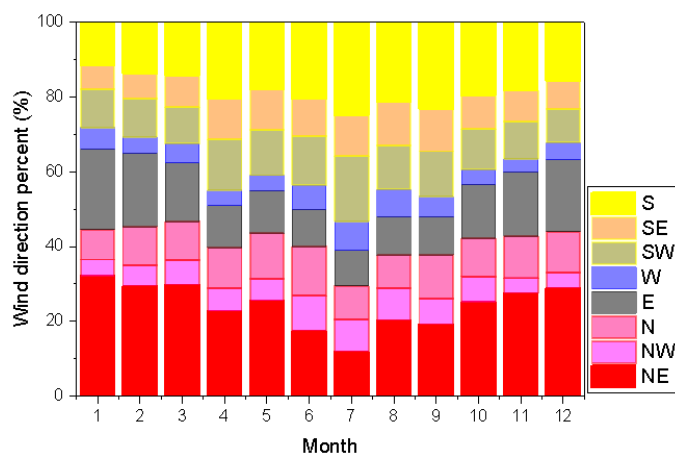


图 14 逐月风向分布

Figure 14 Monthly wind direction distribution

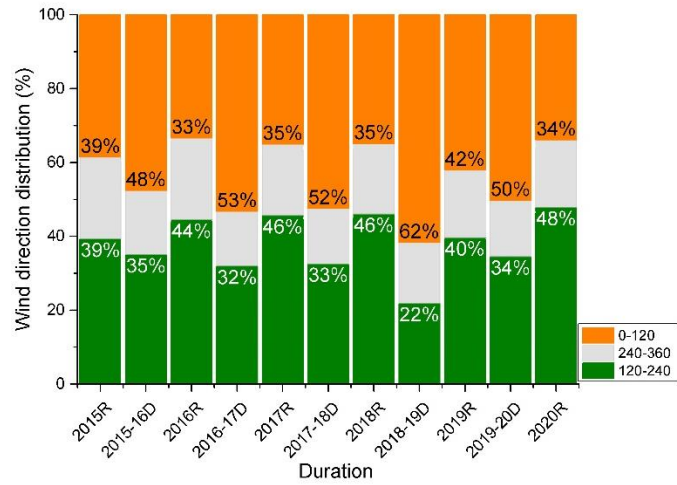


图 15 雨季和旱季主导风向

Figure 15 Prevailing wind direction during rain and dry season

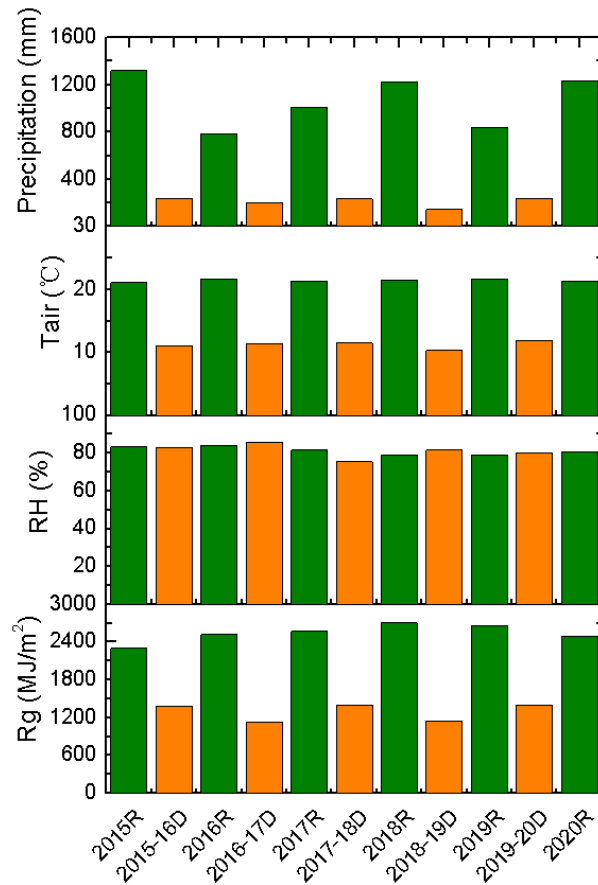


图 16 历年雨季和旱季降雨、空气温湿度、辐射变化

Figure 16 Precipitation, air temperature, air relative humidity, and radiation change during rain and dry season each year

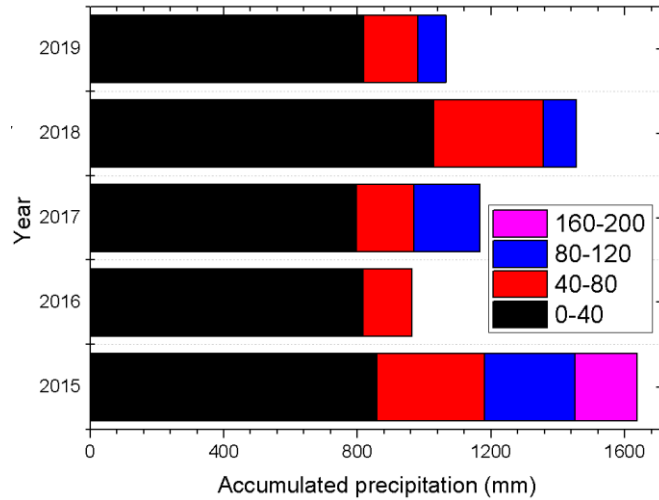


图 17 不同降雨强度降雨量贡献

Figure 17 Precipitation contribution of different rainfall intensities

如图 17 所示，以 2015 至 2020 年为例，研究区年均温 16.3°C ，其中雨季平均温度 21.4°C ，旱季平均温度 11.2°C ，无明显年际波动。雨季和旱季空气湿度相对，平均为 81%。雨季平均总辐射 2541 MJ，最大波动为 12%，旱季平均总辐射 1288 MJ，最大波动为 27%。雨季平均降雨量 1070 mm，旱季平均降雨量 211 mm。如图 16 所示，降雨量年际变化主要受暴雨（日降雨量超过 40 mm）过程影响，年际波动较大，雨季降雨量差异可以超过 500 mm，旱季差异可达 100 mm。有研究表明我国西南地区降雨频次整体呈现下降趋势(Liu et al., 2014)，但极端降雨（降雨大于 95%分位事件）呈现增加趋势，以贵州为例，极端降雨对总降雨量的贡献超过 1/3 (Zheng et al., 2022)。

2.2 植被

2.2.1 样地植被胸径变化

利用植物生长环，按照树种和胸径分布，对样地内 19 树种共 98 棵树木进行连续胸径 (DBH) 变化观测，如图 18 所示，可见树木胸径增加主要集中在雨季，且年际之间生长速率较为一致，但不同树木之间差异较大，平均每年胸径增加最高可达 3.5 cm，最小仅为 0.02 cm。

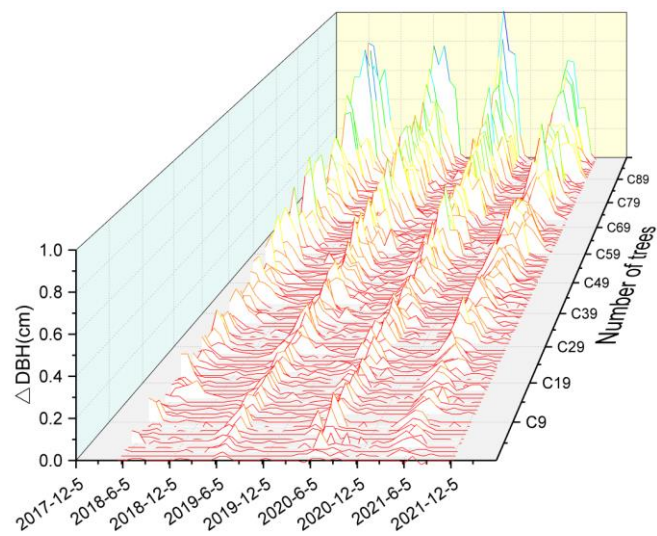


图 18 自然恢复样地 98 棵树木胸径季节变化记录

Figure 18 Records of seasonal changes of DBH for 98 trees at natural regeneration site

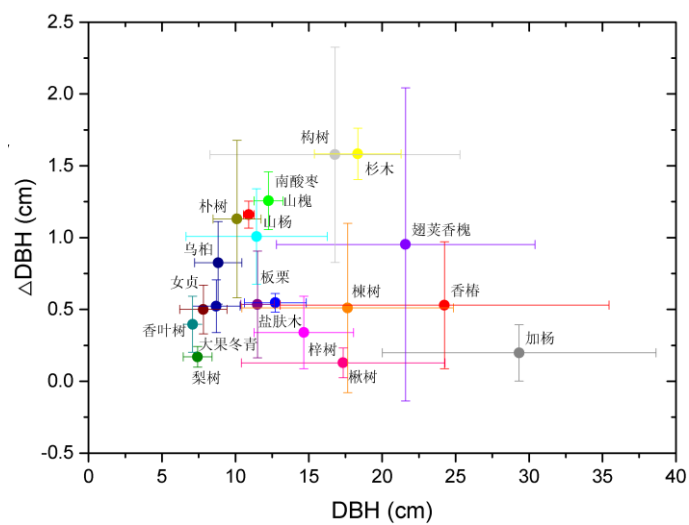


图 19 2019 年不同树种平均胸径变化

Figure 19 Average DBH changes for different tree species during 2019

以 2019 年为例，不同树种平均胸径变化如图 19 所示。可以发现同一树种不同胸径大小胸径增加量差异较大，且胸径本身大小与胸径变化无明显关系，整体上杉木、构树、山槐、山杨、南酸枣、朴树等树种生长较快，加杨、梨树、楸树等生长较慢，说明小生境异质性和树种对树木生长的影响较大。以楸树为例，如图 20 所示，可以发现胸径大小与胸径增加量并无统一规律，且每年胸径变化幅度较为稳定，结合树木具体生长环境，发现树木生长速度主要受小生境影响，生长快的植株往往靠近墙角位置，对营养物质的竞争相近较小。生境是生物出现的环境空间范围，小生境是小尺度的生境，岩溶区小生境的多样性导致群落组成物种的多样性和复杂性，从旱生植物到湿生植物,喜光植物到耐阴植物,耐贫瘠树种到喜肥树种,生态幅较大的植物到生态幅较狭窄的喜钙植物都有分布,它们分别占领了与其特性相应的小生境(温远光 et al., 2022)。对云南石林的研究证实喀斯特地区小生境对土壤和植被具有显著影响，特别是当基岩裸露面积达到 1 平方米时影响最大(Xin Shen et al., 2022)。

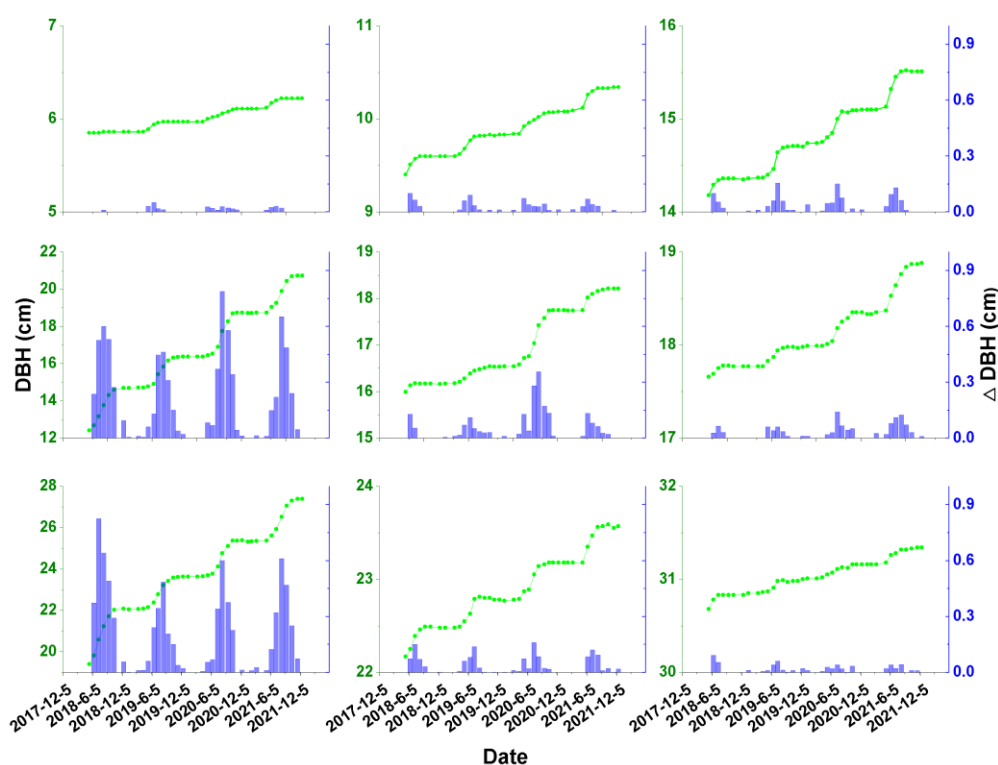


图 20 不同小生境楸树胸径季节变化

Figure 20 Seasonal changes in DBH of neem in different niches

2.2.2 样地生物量变化

自 2010 年建立退耕样地进行自然恢复后，划定了 1.3 公顷的调查样方，分别于 2012 年、2014 年、2015 年、2017 年、2020 年和 2022 年进行了植被调查工作。基于以上 6 次植被调查数据，并根据前人对当地主要树种建立的异速生长方程，计算了样方生物量大小变化。如图 21 所示，计算结果表明样地生物量在 10 年内增加明显，2012 年生物量仅为 8 t/ha，截止 2022 年达到 40 t/ha，且呈现指数方式增加，并且在自然恢复第 10 年已达到人工林生物量水平。依据文献资料，当地 50 年左右的次生林地上生物量约为 140 tC/ha (Liu et al., 2016)，按照生态系统演替规律，推测研究样地目前正处于快速恢复阶段，生物量还会进行快速增加。

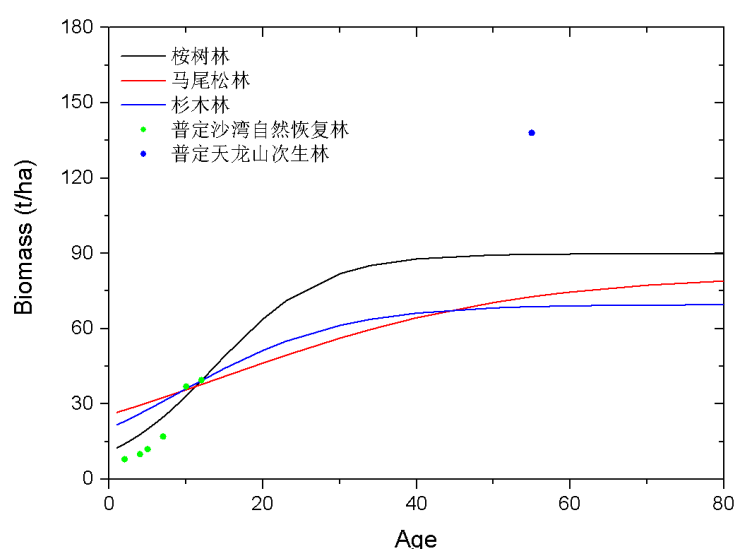


图 21 普定站自然恢复样地生物量变化

Figure 21 Biomass change at Puding Station natural regeneration site

第六次至第九次全国森林清查资料（1999-2018）表明全国森林碳储量增加 6.6Pg，天然林贡献 65%，主要与森林面积的增加有关，其中天然林碳密度为 69 t/ha，人工林为 44 t/ha(Liang et al., 2022)。傅博杰等基于全国 762 个天然林植被碳储量调查结果，发现天然林碳密度为 $80 \pm 12 \text{tC/ha}$ ，远低于成熟林碳密度 160-198 tC/ha，并根据森林碳储量与年龄的关系得出 2010 年我国天然林植被碳储量为 $9.4 \pm 1.5 \text{PgC}$ ，未来固碳潜力为 $8.7 \pm 6.9 \text{PgC}$ ，至 2100 年可实现固碳潜力的 70%，且主要集中在我国西南地区(Chen et al., 2022b)。相较而言，自然恢复样地目前生物量水平远低于全国平均水平，未来增加潜力巨大。

2.3 土壤剖面有机碳变化

普定站退耕样地于 2010 年退耕，为研究退耕后土壤有机碳含量的变化，本研究采用“空间换时间”法，于 2020 年对退耕样地及周边不同土地利用类型不同深度的土壤进行了采样分析，其中正在长期耕作的玉米地作为对照，随机选择了 3 块样地，每个样地随机选择 3 个采样点，每个采样点利用土钻取三个不同深度（0-10 cm、10-20 cm、20-30 cm）的土壤样品进行分析测试。另外利用相同的采样方法对 3 块退耕样地、1 块葡萄种植地、1 块李子种植地、1 块韭菜种植地、2 块水稻田、1 块草地、2 块风水林进行了采样。其中葡萄种植地、韭菜种植地和水稻田由于地势的原因皆属水田，而其他土地利用类型为旱地特征。

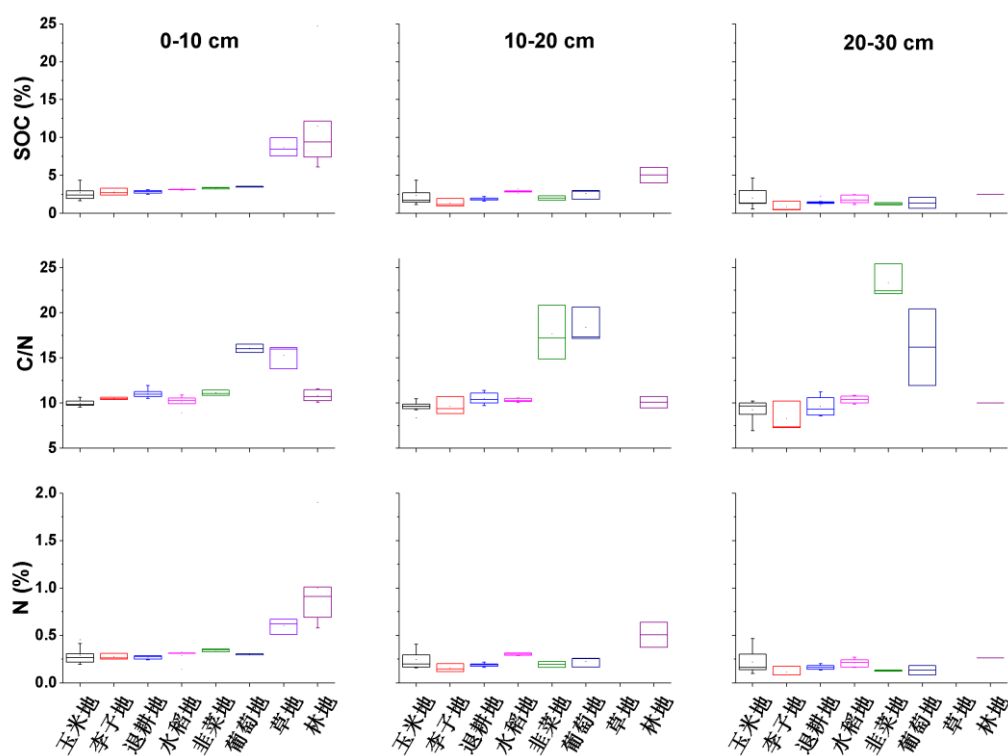


图 22 普定站不同土地利用类型土壤剖面有机碳、总氮、碳氮比

Figure 22 Soil organic carbon, total nitrogen and carbon-nitrogen ratio in soil profiles of different land use types at Puding Station

如图 22 所示，退耕 10 年后，退耕地表层土壤有机碳较未退耕地（玉米地）高 4%，中、下层分别低 20%、26%，表明退耕初期土壤有机碳整体呈下降趋势，而碳氮比相较略微增加。并且农业用地（包括初期退耕地）土壤有机碳含量整体上远低于草地和森林用地，同时土壤深度普遍大于 30 cm，表明农田退耕后土壤

有机碳增汇潜力较大，但具体固碳速率有待深入研究。另外韭黄地、葡萄地和草地土壤碳氮比相对较高，主要与土壤无机碳含量较高有关。

退耕还林增加土壤有机碳已被大量调查研究证实，但不同地区不同土壤条件下固碳速率差异较大，其中样品的数量和代表性对结果的可靠性有重要影响 (Beillouin et al., 2023)。比如基于全国 181 个样地土壤有机碳的观测，证明退耕还林 5 年后土壤有机碳呈现增加趋势，且表层 (0-20 cm) 显著高于深层 (20-100 cm)，并且在 40 年后趋于稳定，表层土壤有机碳累积速率平均为 33 gC/m²/a，深层平均为 38 gC/m²/a (Deng et al., 2014)。对普定陈旗小流域退耕地表层土壤有机碳的调查研究也表明农田退耕后土壤有机碳含量在 40 年内呈现升高趋势，平均升高速率约为 12% (Chen et al., 2022a)。另外广西古周退化喀斯特坡地经过 13 年的生态恢复，香椿树种植和自然恢复分别可使农田土壤有机碳含量升高 40% 和 50%，分别使土壤氮含量升高 130% 和 117% (Xiao et al., 2017)。黄土高原地区森林恢复导致的土壤有机碳累积速率可达 75 gC/m²/a (Zhao et al., 2015)。前苏联地区退耕地表层土壤 (0-5 cm) 固碳速率约为 66 gC/m²/a，其中前 10 年固碳速率高达 104 gC/m²/a，而之后 10 年固碳速率为 26 gC/m²/a (Wertebach et al., 2017)。英国森林恢复 75 年内土壤有机碳平均增速为 49 gC/m²/a (Ashwood et al., 2019)。

2.4 碳通量变化

基于涡度相关仪器架设高度以及植被冠层高度信息，利用涡度相关观测数据，通过 Kljun 的在线足迹模型分析工具(FFPonline)，得到观测期间多年足迹贡献区分布，如图 23 所示，其中通量塔位于中心点位置，可以发现超过 80%左右的足迹贡献区分布于通量塔 200 米以内，说明通量观测数据主要代表次生林样地。

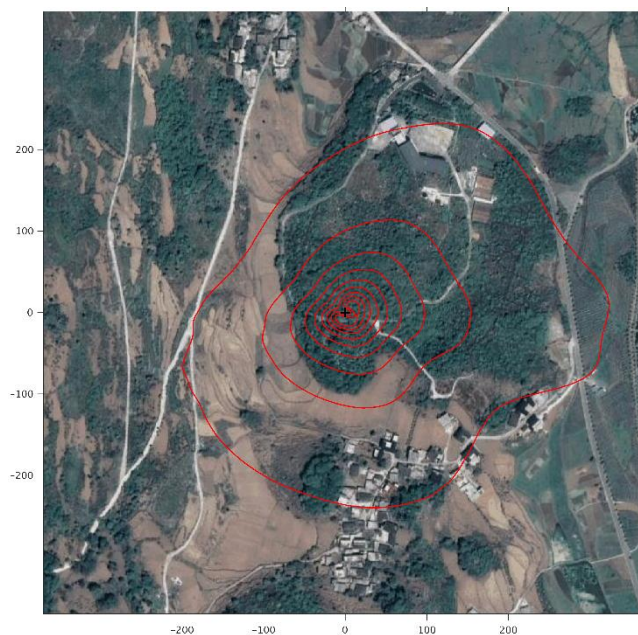


图 23 普定站涡度相关法通量观测气候足迹图

(红线由内至外分别代表 10% 至 90% 足迹贡献区)

Figure 23 Footprint of eddy covariance flux observation in Puding Station

(The red contour line form inside to outside represent 10% to 90% footprint contribution area)

如图 24 所示为剔除异常值后的生态系统净交换 (NEE) 原始观测数据变化情况，其中横坐标代表每小时分辨率的通量日变化情况，纵坐标代表每日分辨率通量的季节变化情况，红色区域代表生态系统在夜间 CO_2 的净释放，蓝色区域代表生态系统在白天 CO_2 的净吸收。可以发现碳通量呈现明显的日、季节变化特征，雨季白天碳吸收和夜间碳释放远高于旱季，与植被物候和气象条件变化规律一致。其中空白处代表数据缺失，观测期间有效数据占比 49%，由于部分数据缺失间隔时间过长（受疫情影响无法及时维护仪器导致长时间数据缺失），故插补后仍有 5% 的空白，如图 25 所示。对于短期数据缺失主要有经典的线性内插法、查表法或平均法等，目前对于较长数据缺失间隔情况还没有很好的插补方法，故

在计算年累计碳通量时只计算数据完整的年份。

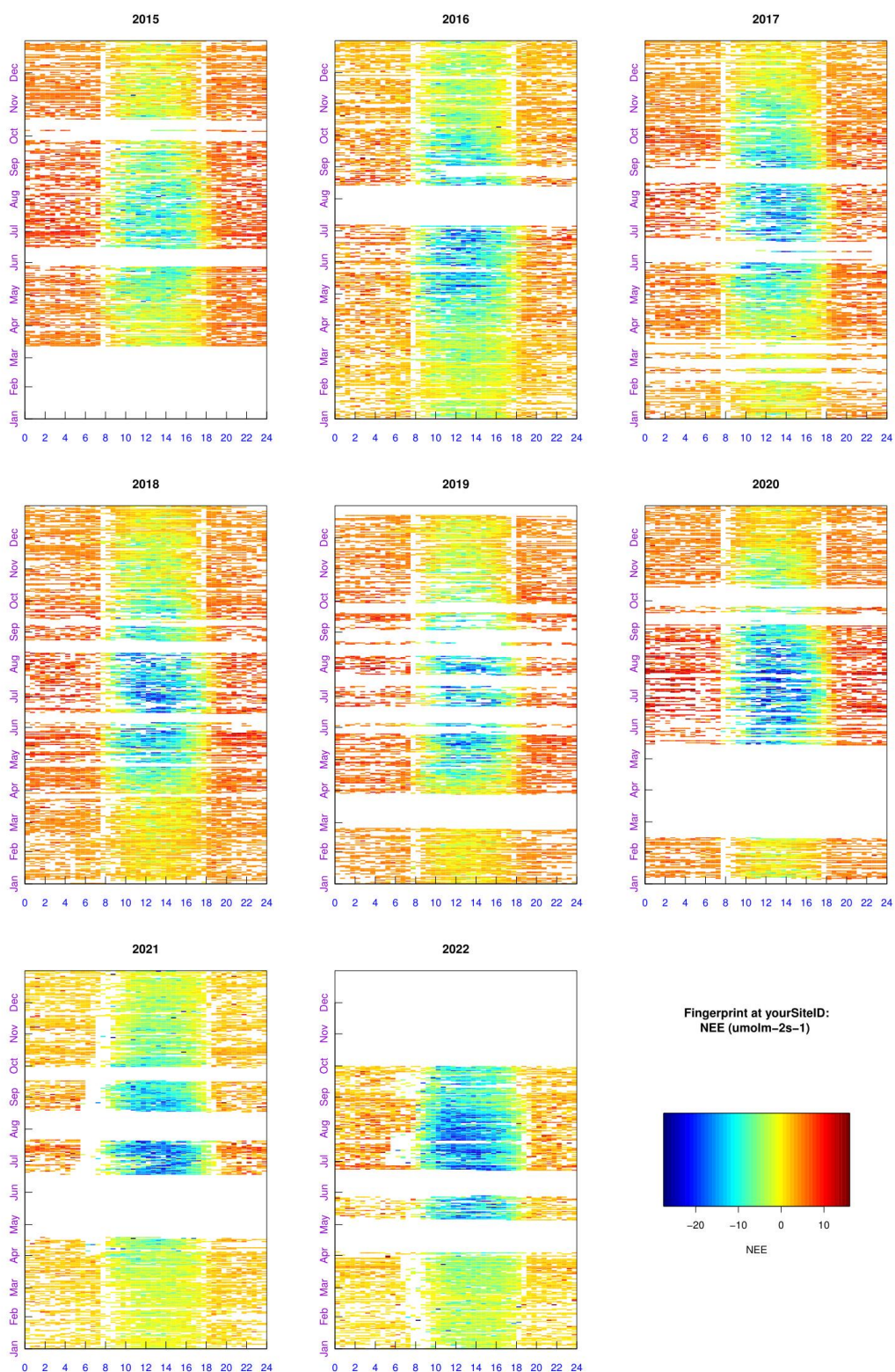


图 24 普定站自然恢复样地 NEE 指纹图

Figure 24 Fingerprint image of NEE at Puding Station natural regeneration site

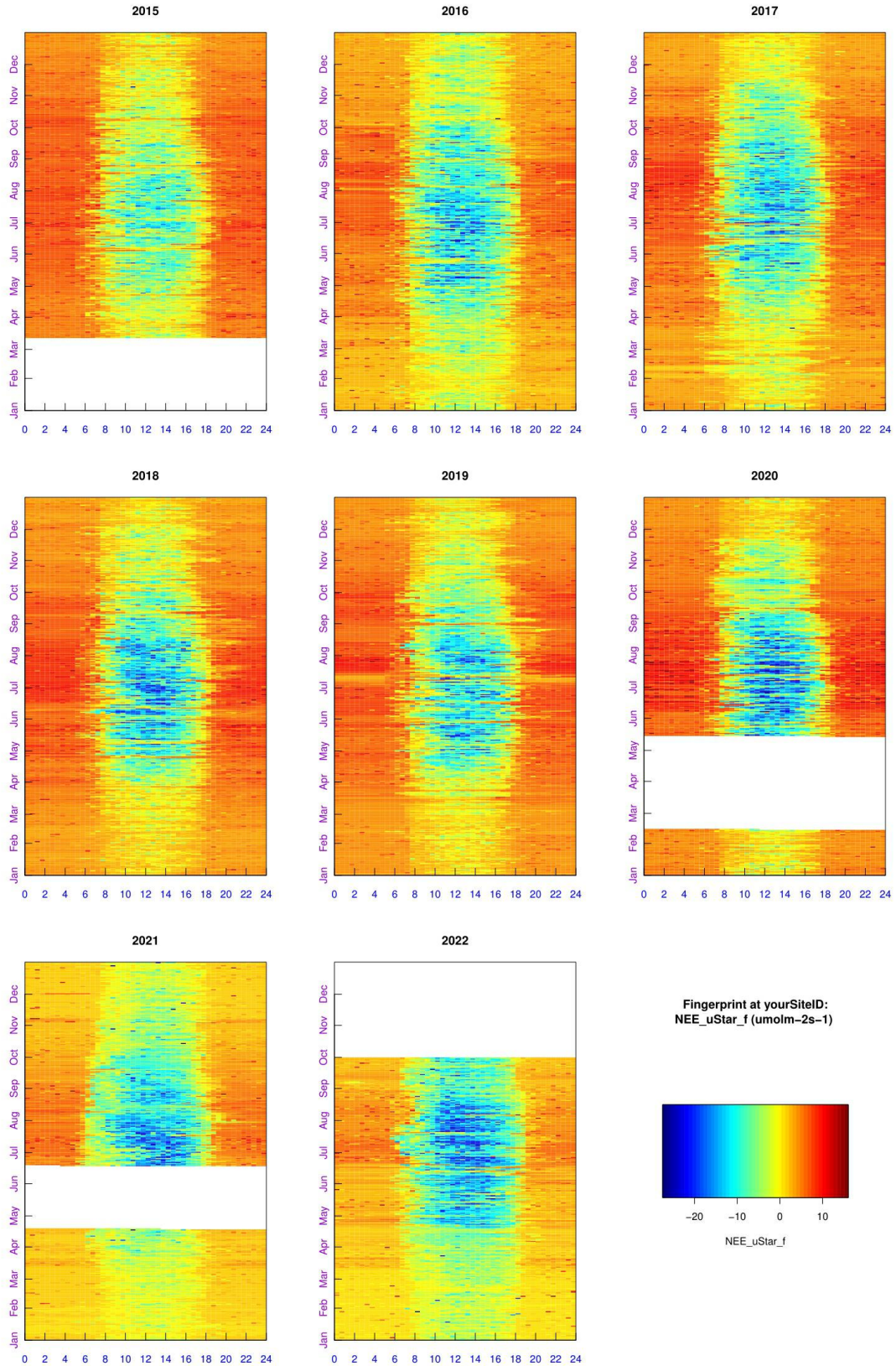


图 25 普定站自然恢复样地插补后 NEE 指纹图

Figure 25 Fingerprint image of NEE after interpolating at Puding Station natural regeneration site

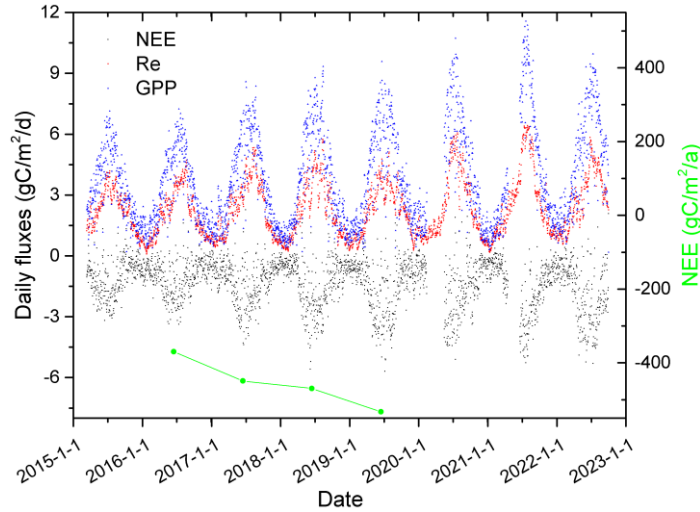


图 26 2015-2022 年自然恢复样地日和年尺度 NEE 变化

Figure 26 Daily and yearly NEE variation of the study site from 2015 to 2022

通过对插补后的通量数据计算每日累计碳通量，得到日尺度的碳通量结果，如图 26 所示。日尺度 NEE 的年际变化更加直观的反映出生态系统 NEE 随生态系统演替而增加的趋势，其中雨季生态系统 NEE 峰值年际增加明显。通过计算 2016 年至 2019 年完整的通量数据，得到年累计 NEE 呈现逐年增加的趋势，由 2016 年的 $-370 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 增加至 2019 年的 $-533 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ ，增加趋势达 $50 \text{ gC/m}^2/\text{a}^2$ 。NEE 为生态系统初级生产力 (GPP) 和生态系统呼吸 (Re) 的差值，通过夜间 NEE 数据进行拆分得到 GPP 和 Re 数据，发现随着生态演替的进行而都呈现逐渐增大的趋势，GPP 由 2016 年的 $1083 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 增加至 2019 年的 $1330 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ ，Re 由 2016 年的 $713 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 增加至 2019 年的 $797 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ ，GPP 增加程度高于 Re，导致 NEE 逐年增加。样地 NEE 的年际增加趋势也高于其他地区的成熟林，比如针对加拿大混交林 17 年的通量观测表明 NEE 年际增加趋势为 $16 \text{ gC/m}^2/\text{a}^2$ (Froelich et al., 2015)，美国哈佛森林 13 年的通量观测发现 NEE 年际增加趋势为 $15 \text{ gC/m}^2/\text{a}^2$ (Urbanski et al., 2007)，美国霍兰德森林 25 年通量观测得出 NEE 年际增加趋势为 $2.4 \text{ gC/m}^2/\text{a}^2$ (Hollinger et al., 2021)，丹麦山毛榉森林 13 年的通量观测得到 NEE 增加趋势为 $23 \text{ gC/m}^2/\text{a}^2$ (Pilegaard et al., 2011)，说明森林演替初期固碳能力更强，这与传统的生态系统演替假设一致 (Corman et al., 2018; Curtis and Gough, 2018)。

如图 27 所示，除哀牢山森林站点外，普定站自然恢复样地 NEE 高于全国其他森林站点 (Fei et al., 2017; Tan et al., 2012; Tang et al., 2016; Zhang et al., 2006)，说明退耕地自然恢复初期固碳能力较强。不同站点森林生态系统 NEE 与年龄并

无绝对关系，表明植被类型、气候、土壤等其他因素影响的重要性。

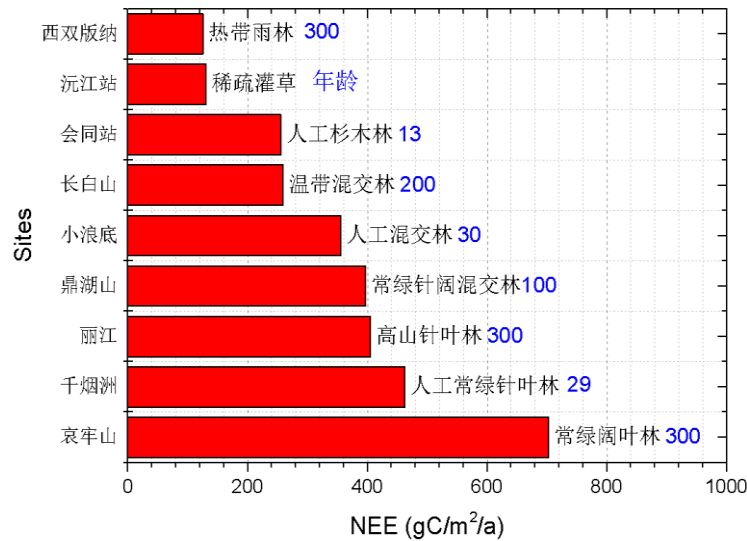


图 27 中国通量网森林站点 NEE 对比

Figure 27 Comparison of forest NEE with Chinaflux sites

2.5 蒸散发变化

如图 28 所示，自然恢复样地雨季蒸散发（ET）平均为 400 mm，旱季平均为 169mm，雨季超过旱季的两倍。潜在蒸散发雨季平均为 598mm，旱季平均为 254mm。ET 年际变化与 NEE 不同，而是与潜在蒸散发变化一致，呈现先升高后降低的趋势，全年蒸散发占平均潜在蒸散发的 67%，平均降雨量的 44%，说明生态系统蒸散发整体上受气候控制，为能量限制型。

如图 29 所示，利用 Budyko 框架，可以发现自然恢复样地季节和年际尺度上 ET 主要受能量控制，即实际蒸散发占降雨量比例（ET/P）随潜在蒸散发占降雨量比例（PET/P）的升高而增加，只有当前一个季节干旱时受 ET 增加的影响，同时下一个季节连续干旱时会导致当季 ET/P 比例的下降，说明只有连续的干旱才会导致水分限制的发生。这可能与研究区受亚热带湿润季风气候对降雨的控制以及表层岩溶带对水分的存储有关，单个季节尺度上的干旱会增加 ET（能量限制），而由此减少的水分会被下个季节的降雨所补充，说明自然恢复的喀斯特生态系统对降雨的季节性有较好的适应性。但受生态系统尺度代表性所限，目前该研究结果还需要在小流域尺度上通过对 ET 变化的长期观测研究来进一步验证。

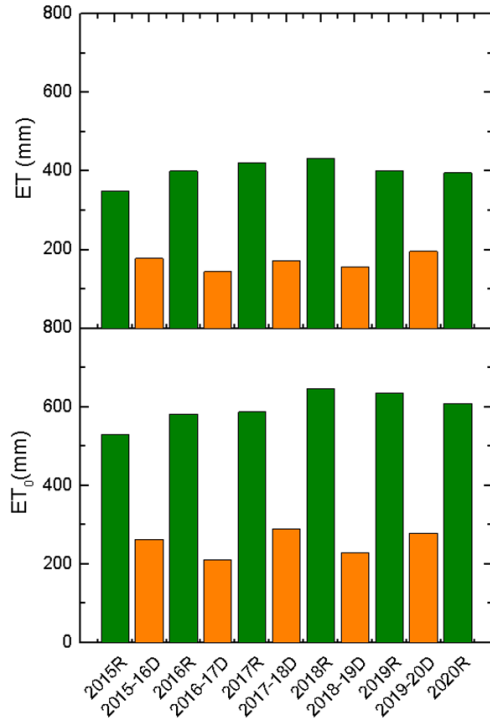


图 28 2015-2020 年自然恢复样地雨季和旱季蒸散发与潜在蒸散发变化
 Figure 28 Variation of evapotranspiration and potential evapotranspiration during rain and dry season of the study site from 2015 to 2020

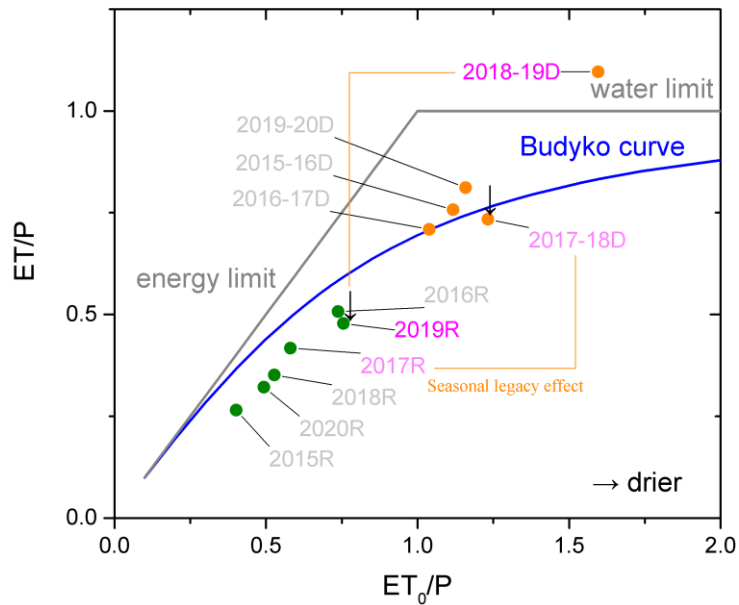


图 29 2015-2020 年自然恢复样地 Budyko 图
 Figure 29 Budyko curve of the study site from 2015 to 2020

杜虎等研究也发现同为亚热带喀斯特森林的环江站木论顶级喀斯特森林蒸散发与辐射相关性最高，亦为能量限制型(Hu et al., 2022)。徐宪立等对陈旗小流

域不同土地利用类型的研究发现生态系统蒸散发随生态系统演替而增加(农田为 513 mm, 草地为 546 mm, 灌丛为 566mm, 次生林为 680 mm), 但整体低于潜在蒸散发, 不会造成过度耗水问题(Yi et al., 2023)。同时也有研究指出我国西南地区植被恢复后增加的蒸散发导致土壤含水量的显著下降(Li et al., 2018; Wei et al., 2022), 并且未来气候变化情景下土壤含水量的下降将会导致能量限制区生态系统更多的受到水分的限制(Denissen et al., 2022), 而当水分限制超过一定阈值时, 生态系统服务功能将会受到影响(Fu et al., 2022)。

第三章 结论与展望

3.1 结论

本研究以贵州省为例,梳理了近三十年以来土地利用变化和石漠化转型及其背后生态治理工程与经济社会发展的驱动机制,并从生态安全、粮食安全、木材安全和“双碳”等角度进行了探讨。并以普定站退耕样地为例,利用涡度相关技术长期观测和对植被与土壤的系统调查,证明了喀斯特地区坡耕地自然恢复的可行性、时效性、优越性,为量化喀斯特地区生态恢复碳汇效应和水文效应提供了生态系统尺度的直接观测证据,同时也可以为相关遥感和模型研究提供可靠的验证数据。结合文献数据的对比分析,本研究主要得到以下几点结论:

1、以贵州为代表的我国西南喀斯特地区经过一系列生态工程的治理和经济社会的快速发展,生态恢复成效十分显著,森林面积持续增加,农田面积小幅下降,石漠化面积由增加转变为减少趋势,发生了从人口-经济-生态恶性循环到人口-经济-生态良性循环的转型,生态恢复也正在从面积增加向质量提升转变,为区域可持续发展奠定了良好的基础;

2、退耕还林政策下,喀斯特地区坡耕地通过自然恢复其生物量可以在 10 年内达到区域相应人工林的生物量水平,并且在经济成本、生物量碳汇潜力、生物多样性和气候适应性等方面都优越于人工林,对于国家坚持自然恢复为主的方针提供了有效支撑。同时,退耕初期表层土壤有机碳呈现增加趋势,但深层土壤有机碳呈现下降趋势,但由于森林土壤剖面有机碳含量普遍高于农田土壤剖面,所以随着进一步的生态演替,退耕地深层土壤有机碳有望得到增加。

3、退耕样地自然恢复初期生态系统净碳交换通量高于亚热带地区其他森林站点通量报道的平均值,且呈现逐年增加的趋势,说明退耕地自然恢复过程有较高的碳汇潜力,并且受气候波动的影响较小,本研究结果为大气反演法得出的区域高碳汇背景提供了新的地面观测证据。

4、退耕样地生态系统蒸散发年际变化并未随生物量增加而增加,而是与潜在蒸散发呈现一致的变化规律,与公认的研究区属于能量限制型认识一致,说明在亚热带湿润季风气候条件下,生态恢复不会造成类似于黄土高原地区水分权衡

的问题。但是在未来极端气候发生频率增加的情况下，连续的干旱有可能对生态系统造成胁迫，进而影响生态恢复进程及其固碳效应，需要进一步研究。

3.2 展望

本研究针对喀斯特退耕地自然恢复过程积累了长期观测数据，但了解生态系统地气交换过程在未来气候变化情景下如何响应，对于评估区域碳汇潜力极为重要，故在已有观测数据验证的基础上，亟需开展模型预测研究。DNDC (Denitrification Decomposition) 模型是目前国际上应用广泛的生物地球化学循环模型，自 1992 年以来经过长期改进，从最初的农田 N₂O 排放模拟发展到涵盖森林、湿地、草原等多种生态系统类型碳、氮、水循环的模拟，并在 2000 年亚太地区全球变化国际会议上被指定为在亚太地区进行推广的首选生物地球化学模型。DNDC 模型应用生物地球化学的理论和方法来分析和预测陆地生态系统的变化，包含植物生长子模型、土壤气候子模型、有机质分解子模型、硝化反应子模型、脱氮反应子模型和发酵反应子模型，通过输入气象数据、土壤性质和植被特征可以以日或小时步长再现生态系统碳、氮、水循环的非线性过程特征。DNDC 模型中土壤参数、植物生长的生理参数及物候参数默认值均为北美地区观测值，在其他地区应用时需要对这些参数进行检验和修正，有时需要对模型中的方程式进行修改，以更好的模拟实际情况。其中 Forest-DNDC 模型可以对森林生物量、碳动态、温室气体排放以及森林管理进行模拟，由山地森林模型 PnET-N-DNDC (光合-蒸散发-硝化-反硝化-分解) 与湿地模型 Wetlands-DNDC 耦合而成，在很多国家和地区得到验证和应用。

如图 30 所示，由于岩溶区植被碳循环过程更为复杂，已在非岩溶区建立的植被碳循环参数不能直接应用于岩溶区，需要对模型参数进行系统测定，并通过长期观测数据对岩溶区植被碳循环模型进行校正和修改。此外，前期课题组研究生李梦德已利用普定站土壤呼吸观测数据对 DNDC 模型进行了验证，积累了一定的研究经验。

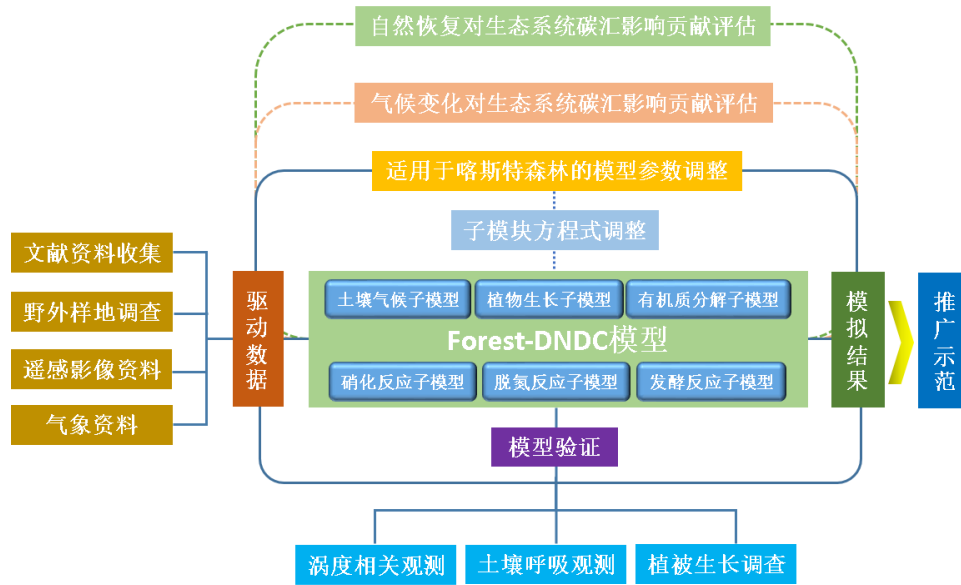


图 30 DNDC 模型研究框架

Figure 30 Research framework for DNDC model

另外，本研究针对样地尺度生态系统蒸散发的长期变化进行了研究，并发现连续干旱的限制作用，未来可以在小流域尺度上进行进一步的验证研究。由于喀斯特地区特殊的地上地下二元三维结构导致其水循环和生态水文过程不同于非喀斯特地区，传统的流域水平衡法在短期往往无法准确反映 ET 的响应与反馈过程。所以采用双波长闪烁仪法进行小流域尺度的水热通量观测，同时利用涡度相关法对流域内不同类型下垫面进行水热通量的局部独立观测，可以得到小流域尺度蒸散发的直接观测数据。利用小流域尺度蒸散发的直接观测结果，一方面可以分析其受气候变化和生态恢复的响应机制；另一方面也可以检验流域水平衡性假设，并在流域水平衡的约束下分析地下水补给和跨区流动的可能贡献和过程，从而对流域水循环全过程进行定量研究。小流域作为连接微观和宏观尺度的重要纽带，相较生态系统尺度可以更好的回答气候变化和生态恢复背景下喀斯特地区水循环过程的响应问题。

参考文献

- Ashwood, F. et al., 2019. Woodland restoration on agricultural land: long-term impacts on soil quality. *Restoration Ecology*, 27(6): 1381-1392.
- Beillouin, D. et al., 2023. A global meta-analysis of soil organic carbon in the Anthropocene. *Nat Commun*, 14(1): 3700.
- Brandt, M. et al., 2018. Satellite-observed major greening and biomass increase in South China Karst during recent decade. *Earth's Future*, 6(7): 1017-1028.
- Cai, W. et al., 2021. Carbon sequestration of chinese forests from 2010–2060: spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies. *Science Bulletin*.
- Chazdon, R.L. et al., 2020. Fostering natural forest regeneration on former agricultural land through economic and policy interventions. *Environmental Research Letters*, 15(4).
- Chen, B., Zhang, H., Wang, T. and Zhang, X., 2021. An atmospheric perspective on the carbon budgets of terrestrial ecosystems in China: progress and challenges. *Sci Bull (Beijing)*, 66(17): 1713-1718.
- Chen, L. et al., 2023. Karst carbon sink processes and effects: A review. *Quaternary International*, 652: 63-73.
- Chen, S. et al., 2022a. Pool complexity and molecular diversity shaped topsoil organic matter accumulation following decadal forest restoration in a karst terrain. *Soil Biology and Biochemistry*, 166.
- Chen, S. et al., 2022b. Current and future carbon stocks of natural forests in China. *Forest Ecology and Management*, 511.
- Corman, J.R. et al., 2018. Foundations and frontiers of ecosystem science: legacy of a classic paper (Odum 1969). *Ecosystems*, 22(5): 1160-1172.
- Crawford, C.L., Yin, H., Radeloff, V.C. and Wilcove, D.S., 2022. Rural land abandonment is too ephemeral to provide major benefits for biodiversity and climate. *Sci Adv*, 8(21): eabm8999.
- Curtis, P.S. and Gough, C.M., 2018. Forest aging, disturbance and the carbon cycle.

- New Phytol, 219(4): 1188-1193.
- Deng, L., Liu, G.B. and Shangguan, Z.P., 2014. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis. *Glob Chang Biol*, 20(11): 3544-56.
- Deng, X., Lian, P., Zeng, M., Xu, D. and Qi, Y., 2021. Does farmland abandonment harm agricultural productivity in hilly and mountainous areas? evidence from China. *Journal of Land Use Science*, 16(4): 433-449.
- Denissen, J.M.C. et al., 2022. Widespread shift from ecosystem energy to water limitation with climate change. *Nature Climate Change*, 12(7): 677-684.
- Fei, X. et al., 2017. Carbon exchanges and their responses to temperature and precipitation in forest ecosystems in Yunnan, Southwest China. *Sci Total Environ*.
- Feng, R., Hu, L., Hu, X. and Fang, X., 2023. Knowledge gaps are making it harder to formulate national climate policies. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 120(23): e2218563120.
- Froelich, N., Croft, H., Chen, J.M., Gonsamo, A. and Staebler, R.M., 2015. Trends of carbon fluxes and climate over a mixed temperate–boreal transition forest in southern Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 211-212: 72-84.
- Fu, Z. et al., 2022. Critical soil moisture thresholds of plant water stress in terrestrial ecosystems. *Science Advances*, 8(44): eabq7827.
- Fuhrman, J. et al., 2020. China's 2060 carbon neutrality goal will require up to 2.5 GtCO₂/year of negative emissions technology deployment, pp. arXiv:2010.06723.
- Han, Z. and Song, W., 2019. Spatiotemporal variations in cropland abandonment in the Guizhou–Guangxi karst mountain area, China. *Journal of Cleaner Production*, 238.
- He, H. et al., 2019. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. *National Science Review*, 6(3): 505-514.

- Hollinger, D.Y. et al., 2021. Multi-decadal carbon cycle measurements indicate resistance to external drivers of change at the Howland Forest AmeriFlux Site. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(8).
- Hu, D. et al., 2022. Water-use efficiency in a humid karstic forest in southwestern China: interactive responses to the environmental drivers. *Journal of Hydrology*.
- Hu, P.-L. et al., 2018. Effects of environmental factors on soil organic carbon under natural or managed vegetation restoration. *Land Degradation & Development*, 29(3): 387-397.
- Hu, S. and Mo, X., 2022. Diversified evapotranspiration responses to climatic change and vegetation greening in eight global great river basins. *Journal of Hydrology*, 613.
- Jiang, F. et al., 2016. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches. *Sci Rep*, 6: 22130.
- Li, L., Chhatre, A. and Liu, J., 2019. Multiple drivers and pathways to China's forest transition. *Forest Policy and Economics*, 106.
- Li, Y. et al., 2018. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China. *Sci Adv*, 4(5): eaar4182.
- Liang, B. et al., 2020. Analysing and simulating spatial patterns of crop yield in Guizhou Province based on artificial neural networks. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*.
- Liang, B. et al., 2022. Planted forest is catching up with natural forest in China in terms of carbon density and carbon storage. *Fundamental Research*.
- Liang, B., Quine, T.A., Liu, H., Cressey, E.L. and Bateman, I., 2021. How can we realize sustainable development goals in rocky desertified regions by Enhancing crop yield with reduction of environmental risks? *Remote Sensing*, 13(9).
- Liu, L. et al., 2016. Biomass of karst evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in central Guizhou province, southwestern China: a comprehensive inventory of a 2 ha plot. *Silva Fennica*, 50(3): 16.
- Liu, M. et al., 2014. Is southwestern China experiencing more frequent precipitation extremes? *Environmental Research Letters*, 9(6).

- Liu, Z. et al., 2018. Large and active CO₂ uptake by coupled carbonate weathering. *Earth-Science Reviews*, 182: S0012825217306153.
- Lu, F. et al., 2018. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 115(16): 4039-4044.
- Ma, M. et al., 2019. Research progress and prospect of observation and simulation of carbon cycle in the karst areas of Southwest China. *Progress in Geography*, 38(8): 1196-1205.
- Mather, A.S. and Needle, C.L., 1998. The forest transition: a theoretical basis. *Area*, 30(2): 117-124.
- Nandal, A., Yadav, S.S., Rao, A.S., Meena, R.S. and Lal, R., 2023. Advance methodological approaches for carbon stock estimation in forest ecosystems. *Environ Monit Assess*, 195(2): 315.
- Piao, S. et al., 2009. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 458(7241): 1009-13.
- Pilegaard, K., Ibrom, A., Courtney, M.S., Hummelshøj, P. and Jensen, N.O., 2011. Increasing net CO₂ uptake by a Danish beech forest during the period from 1996 to 2009. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(7): 934-946.
- Qian, C., Qiang, H., Zhang, G. and Li, M., 2021. Long-term changes of forest biomass and its driving factors in karst area, Guizhou, China. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 17(8).
- Qiu, S. et al., 2022. Unraveling trade-offs among reforestation, urbanization and food security in the South China Karst Region: How can a hinterland province achieve SDGs? *Earth's Future*.
- Stoy, P.C. et al., 2023. The global distribution of paired eddy covariance towers. *bioRxiv*: 2023.03.03.530958.
- Tan, Z.-H. et al., 2012. An observational study of the carbon-sink strength of East Asian subtropical evergreen forests. *Environmental Research Letters*, 7(4): 044017.
- Tang, Y. et al., 2016. Variation of carbon use efficiency over ten years in a subtropical coniferous plantation in southeast China. *Ecological Engineering*, 97: 196-206.

- Tian, H. et al., 2011. Net exchanges of CO₂, CH₄, and N₂O between China's terrestrial ecosystems and the atmosphere and their contributions to global climate warming. *Journal of Geophysical Research*, 116(G2).
- Tong, X. et al., 2018. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. *Nature Sustainability*, 1(1): 44-50.
- Urbanski, S. et al., 2007. Factors controlling CO₂ exchange on timescales from hourly to decadal at Harvard Forest. *Journal of Geophysical Research*, 112(G2).
- Wang, F. et al., 2023a. Climate change: Strategies for mitigation and adaptation. *The Innovation Geoscience*: 100015-1-100015-35.
- Wang, J. et al., 2020. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 586(7831): 720-723.
- Wang, L., Pedersen, P.B.M. and Svenning, J.-C., 2023b. Rewilding abandoned farmland has greater sustainability benefits than afforestation. *npj Biodiversity*, 2(1).
- Wang, Q., Zheng, H., Zhu, X. and Yu, G., 2015. Primary estimation of Chinese terrestrial carbon sequestration during 2001–2010. *Science Bulletin*, 60(6): 577-590.
- Wei, X., Gao, J., Liu, S. and Zhou, Q., 2022. Temporal variation of soil moisture and its influencing factors in karst areas of Southwest China from 1982 to 2015. *Water*, 14(14).
- Wertebach, T.M. et al., 2017. Soil carbon sequestration due to post-Soviet cropland abandonment: estimates from a large-scale soil organic carbon field inventory. *Glob Chang Biol*, 23(9): 3729-3741.
- Wutzler, T. et al., 2018. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. *Biogeosciences*, 15(16): 5015-5030.
- Xiao, K. et al., 2017. Impacts of vegetation restoration strategies on soil organic carbon and nitrogen dynamics in a karst area, southwest China. *Ecological Engineering*, 101: 247-254.
- Xin Shen, Y., Wang, Q.H., Zhao, Z.M. and Yuan, C., 2022. Fine-scale effect of karst rock outcrops on adjacent soil and plant communities in Southwest China.

- Catena, 219.
- Yao, Y., Piao, S. and Wang, T., 2018. Future biomass carbon sequestration capacity of Chinese forests. *Sci Bull (Beijing)*, 63(17): 1108-1117.
- Yi, R., Xu, X., Zhang, Y., Ye, Z. and Wang, K., 2023. Grain for green project may not threaten ecosystem sustainability by degrading water availability in humid karst Landscapes. *Water Resources Research*, 59(3).
- Zeng, Q. et al., 2017. Carbonate weathering-related carbon sink fluxes under different land uses: A case study from the Shawan Simulation Test Site, Puding, Southwest China. *Chemical Geology*, 474: 58-71.
- Zeng, S., Liu, Z. and Kaufmann, G., 2019. Sensitivity of the global carbonate weathering carbon-sink flux to climate and land-use changes. *Nature Communications*, 10(1).
- Zeng, W., Tomppo, E., Healey, S.P. and Gadov, K.V., 2015. The national forest inventory in China: History, results, international context. *Forest Ecosystems*. 2: 23., 2.
- Zhang, H. et al., 2016. Influences of stand characteristics and environmental factors on forest biomass and root–shoot allocation in southwest China. *Ecological Engineering*, 91: 7-15.
- Zhang, L. et al., 2006. Seasonal variation of carbon exchange of typical forest ecosystems along the eastern forest transect in China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49(S2): 47-62.
- Zhang, L., Xiao, J., Li, L., Lei, L. and Li, J., 2014a. China's sizeable and uncertain carbon sink: a perspective from GOSAT. *Chinese Science Bulletin*, 59(14): 1547-1555.
- Zhang, Y., Li, X. and Song, W., 2014b. Determinants of cropland abandonment at the parcel, household and village levels in mountain areas of China: A multi-level analysis. *Land Use Policy*, 41: 186-192.
- Zhao, M. et al., 2019. Estimation of China's forest stand biomass carbon sequestration based on the continuous biomass expansion factor model and seven forest inventories from 1977 to 2013. *Forest Ecology and Management*, 448: 528-534.

- Zhao, Y.-G., Liu, X.-F., Wang, Z.-L. and Zhao, S.-W., 2015. Soil organic carbon fractions and sequestration across a 150-yr secondary forest chronosequence on the Loess Plateau, China. *Catena*, 133: 303-308.
- Zheng, G. et al., 2022. The increasing predominance of extreme precipitation in Southwest China since the late 1970s. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 15(5).
- Zheng, J. et al., 2019. The slowdown in China's carbon emissions growth in the new phase of economic development. *One Earth*, 1(2): 240-253.
- 安和平, 赵栋昌, 王君莉 and 邹波, 2009. 贵州省人口、资源环境与经济协调发展的初步探究. *中国人口.资源与环境*, pp. 72-76.
- 胡芳, 杜虎, 曾馥平等, 2017. 广西不同林龄喀斯特森林生态系统碳储量及其分配格局. *应用生态学报*, 28(003): 721-729.
- 黄宗胜, 喻理飞, 符裕红等, 2015. 茂兰退化喀斯特森林植被自然恢复中生态系统碳吸存特征. *植物生态学报*, 39(06): 554-564.
- 柴梅, 田明华, 杜磊, 王芳 and 刘丹, 2022. 中国木材对外依存度降低的可能性分析. *北京林业大学学报(社会科学版)*, 21(01): 19-28.
- 储小院, 朱仕荣, 林琼 and 王帆, 2020. 我国石漠化防治立法的必要性与可行性探讨. *中国水土保持(06)*: 18-22+30.
- 韩昭庆, 2015. 清中叶至民国玉米种植与贵州石漠化变迁的关系. *复旦学报(社会科学版)*, 57(04): 91-99.
- 李海萍, 李定恒 and 李豪, 2022. 贵州省退耕还林还草潜在碳汇效益评估. *生态学报*, 42(23): 9499-9510.
- 刘立斌, 许海洋, 郭银明等, 2020a. 基于树木年轮定量重建过去 50 年贵州典型森林优势树种的地上生物量与生产力变化. *生态学报*, 40(10): 291-301.
- 刘立斌, 周运超, 程安云等, 2020b. 利用皆伐法估算黔中喀斯特森林地上生物量. *生态学报*, 40(13): 4455-4461
- 王克林, 岳跃民, 陈洪松等, 2019. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应. *生态学报*, 39(20): 7432-7440
- 王绍强, 陈蝶聪, 周蕾等, 2013. 中国陆地生态系统通量观测站点空间代表性. *生态学报*, 33(24): 7715-7728.

- 王灿, 张., 2020. 碳中和愿景的实现路径与政策体系. 中国环境管理, v.12;No.72(06): 60-66.
- 王世杰, 2003. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态地质环境问题. 矿物岩石地球化学通报(02): 120-126.
- 吴敏, 刘淑娟, 叶莹莹等, 2016. 喀斯特地区坡耕地与退耕地土壤有机碳空间异质性及其影响因素. 生态学报, 36(6): 1619-1627.
- 温远光, 周晓果, 王磊, 孙冬婧 and 朱宏光, 2022. 中国岩溶森林生态保护修复的理论与技术. 广西科学, 29(01): 61-70.
- 杨帅 and 唐彦, 2021. 贵州省粮食产需问题及对策研究. 粮食问题研究(03): 33-37.
- 杨元合 et al., 2022. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献. 中国科学:生命科学, 52(04): 534-574.
- 余梦, 李阳兵 and 罗光杰, 2022. 中国西南岩溶山地石漠化演变趋势. 生态学报, 42(10): 4267-4283.
- 袁道先, 2008. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验. 草业科学(09): 19-25.
- 张珍明, 周运超, 李会等, 2017. 喀斯特小流域土壤有机碳分布特征及其影响因素. 地球与环境, 45(01): 38-45.
- 张涵雨 and 陶建军, 2021. 中国木材供需分析. 赤峰学院学报(自然科学版), 37(09): 86-89.
- 中国科学院地学部, 1994. 关于西南岩溶石山地区持续发展与依靠科技脱贫的咨询建议. 中国科学院院刊(04): 343-345.

致谢

多彩贵州，爽爽贵阳，在黔十载，良师益友，于斯为盛。

课题组战略型科学家王世杰研究员高瞻远瞩，顶层设计，把脉喀斯特地区石漠化顽症与生态治理实践，先行喀斯特关键带碳循环模式与机理，深耕喀斯特生态系统长期定位观测研究与示范，心系贵州社会民生与可持续发展，躬耕公共事务舍小家为大家，驻足科学范式和时代浪潮的前沿，格局之广，见解之深，每闻教诲，必受启发。

合作导师罗维均研究员亦师亦友，为学严谨，处事豁达，待人宽让，深受学生喜爱，作为弟子，实属幸运至极。罗老师虽然身兼数职，事务繁忙，但永远将学生的事情摆在首位。罗老师指导研究细致全面，修改论文一丝不苟，组织会议认真无私，野外科考身先士卒，集体活动慷慨大方，为学为事为人皆为楷模。

课题组高级工程师程安云老师亲力亲为，投身普定喀斯特生态系统观测研究站建设和通量观测平台搭建呕心沥血，为系统开展喀斯特生态系统长期定位观测研究奠定了坚实的基础。程老师阅历丰富，知识渊博，每每为学生的全面发展指点迷津，用心良苦，必怀感激。课题组李世杰研究员幽默风趣，博文广知，纯心学术，成果丰硕，喜好篮球，无可匹敌，畅谈时事，字字珠玑，提携后进，不拘一格，寻味面食，不忘分享，关心学生，尽心尽力，良师益友，可遇不可求。

另承蒙刘彧师姐、黄天志、曾广能、李勇、彭海军、杨海泉等师兄厚爱关照，张林、蔡先立、陈佳、蒙明富、史晓明、吕伊娜、谢元欢、王梅芳、杨瀚凌、李子涵、龚思同、翁绪、杨开萍、张小琴、刘凯燕等小组成员在工作学习中同甘共苦，邢学刚、郭倩、孙文清、肖调杰、李梦德、籍进柱、孙国涛、赵彪、季长青、杨久霖、周登强、王小军、苏伟等昔日同学好友在生活中坦诚相待，不胜感激。

最后感谢宁夏大学地理科学与规划学院提供教学科研岗位，让我得以回归家乡并成为一名教师，传承所受所学、发扬所教所习、倾尽所思所想，点亮后继同学，在用心回馈社会的同时，也能承担起照顾家庭的责任。感谢杜灵通老师、张鑫老师引荐。求学十载，聚少离多，对父母、对妻子甚感亏欠。生有涯，知无涯，前路漫漫，上下求索。谨以此文献给满岁的儿子王艾程，愿伴左右，平安喜乐。

神奇宁夏，塞上银川，回归故土，敬待友朋，天涯比邻。

2023年6月于贵阳

作者简介及在学期间科研情况

一、作者简介

王彦伟，男，宁夏西吉人，

2009年7月-2013年6月，中南大学，学士；

2013年7月-2019年6月，中国科学院大学，中国科学院地球化学研究所，博士；

2019年7月-2023年6月，中国科学院地球化学研究所，博士后。

二、发表论文

- (1) **Wang Yanwei**, Luo Weijun*, et al. High ^{222}Rn concentrations and dynamics in Shawan Cave, southwest China, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, 199: 16-24.
- (2) **Wang Yanwei**, Luo Weijun*, et al. Characteristics of carbon, water, and energy fluxes on abandoned farmland revealed by critical zone observation in the karst region of southwest China, *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2020, 292: 106821.
- (3) **Wang Yanwei**, Luo Weijun*, et al. CO_2 flux of soil respiration in natural recovering karst abandoned farmland in Southwest China, *Acta Geochimica*, 2020, 39:527-538.
- (4) Lyu Yina, Luo Weijun*, **Wang Yanwei**, et al. Geochemical responses of cave drip water to vegetation restoration, *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125543.
- (5) Lyu Yina, Luo Weijun*, **Wang Yanwei**, et al; Impacts of cave ventilation on drip water delta $^{13}\text{C}_{(\text{DIC})}$ and its paleoclimate implication, *Quaternary International*, 2020, 547: 7-21.
- (6) Weng Xu, Luo Weijun*, **Wang Yanwei** *, et al. Spatiotemporal variations of radon concentration in the atmosphere of Zhijindong Cave (China), *Atmosphere*, 2021, 12, 967.
- (7) Chen Jia, Luo Weijun*, Zeng Guangneng*, **Wang Yanwei**, et al. Response of surface evaporation and subsurface leakage to precipitation for simulated epikarst

- with different rock–soil structures. *Journal of Hydrology*, 2022, 610.
- (8) Lyu Yina, Luo Weijun*, **Wang Yanwei**, et al. Response of drip water Mg/Ca and Sr/Ca variations in ventilated caves to hydroclimate. *Science of The Total Environment*, 2023, 874: 162626.
- (9) **Yanwei Wang**, Weijun Luo, et al. Time to transformation: what 10 years natural restoration tell? (prep for JGR-A)
- (10) **Yanwei Wang**, Weijun Luo, et al. Seasonal legacy as precondition on drought limitation of ecosystem ET in southwest China karst region. (prep for AFM)
- (11) **王彦伟**, 罗维均, 等. 2015-2019 年贵州普定自然恢复样地碳水通量观测数据集[DS/OL]. *Science Data Bank*, 2023.
- (12) 曾广能, 罗维均, **王彦伟**, 等. 喀斯特洞穴甲烷研究进展. *地球与环境*, 2019, 47: 227-234.
- (13) 杨瀚凌, 罗维均, **王彦伟**, 王世杰. 不同尺度下蒸散量测算方法的应用及展望. *地球环境学报*, 2020, 11: 31-44.
- (14) 李子涵, 罗维均, 杜虎, 宋同清, 彭海军, **王彦伟**, 王世杰. 喀斯特常绿落叶阔叶混交林旱季 CO₂ 通量特征及其影响因子. *地球与环境*, 2020, 48: 525-536.
- (15) 翁绪, 罗维均, **王彦伟**, 等. 贵阳地铁 1 号线氡浓度特征及其潜在健康效应评估. *地球与环境*, 2022, 01: 131-139.
- (16) 罗维均, 杨开萍, **王彦伟**, 等. 喀斯特地区不同岩土组构对岩溶碳通量的影响. *地质科技通报*, 2022, 41(3): 7.
- (17) 张小琴, 罗维均, **王彦伟**, 等. 岩溶试片的岩性差异对估算岩溶速率和碳通量的影响. *中国岩溶*, 2022, 41(3): 538-545.

三、研究项目

- (1) 其他任务：普定喀斯特生态站典型生态系统长期变化趋势分析，参与人。
- (2) 国家自然科学基金项目(41673121)：喀斯特/岩溶洞穴系统碳循环规律及其机理研究，骨干。
- (3) 中科院战略性先导科技专项子课题(XDB40020201)：喀斯特“三水”转化过程及对气候环境变化的响应，骨干。
- (4) 贵州省基础研究（自然科学类）项目（黔科合基础-ZK[2023]一般 475）：典型退化喀斯特生态系统自然恢复初期固碳机制研究，主持。
- (5) 国家自然科学基金地质联合基金课题：“喀斯特流域岩溶碳循环过程及岩溶碳汇效应研究”，参与。

四、会议交流

- (1) 2019 年 11 月，北京，首届全国生态系统观测研究科学大会，摘要：关键带视角下喀斯特生态系统碳通量观测。
- (2) 2019 年 11 月，昆明，第十八届中国生态学大会，口头报告：普定喀斯特关键带碳通量集成观测研究。
- (3) 2021 年 4 月，贵阳，第三届岩溶青年学术论坛，口头报告：我国西南喀斯特地区典型退耕地自然恢复初期碳汇功能。
- (4) 2021 年 7 月，重庆，第 17 届中美碳联盟（USCCC）年会，口头报告：Carbon flux characteristics of typical degraded karst ecosystem during early stage of natural regeneration.
- (5) 2022 年 12 月，兰州，第二届中国陆面蒸散发研究大会，口头报告：喀斯特地区不同土地利用类型蒸散发观测研究。

附录 1: 2020 年普定站土壤有机碳调查数据

序号	编号	有机碳%	总碳 (%)	总氮 (%)	C/N
1	P1-1-1	3.541	4.923	0.308	15.997
2	P1-1-2	3.013	4.471	0.258	17.308
3	P1-1-3	2.099	3.765	0.184	20.444
4	P1-2-1	3.587	4.853	0.294	16.527
5	P1-2-2	1.854	3.468	0.168	20.628
6	P1-2-3	0.662	0.99	0.083	11.948
7	P1-3-1	3.438	4.817	0.309	15.607
8	P1-3-2	2.925	4.392	0.256	17.153
9	Y1-1-1	2.942	3.03	0.308	9.845
10	Y1-1-2	2.716	2.903	0.297	9.775
11	Y1-1-3	3.171	3.257	0.325	10.029
12	Y1-2-1	4.363	4.667	0.456	10.232
13	Y1-2-2	4.349	4.186	0.409	10.232
14	Y1-2-3	4.666	4.653	0.469	9.916
15	Y1-3-1	4.216	4.411	0.415	10.633
16	Y1-3-2	4.379	4.233	0.404	10.472
17	Y1-3-3	3.011	3.102	0.304	10.2
18	Y2-1-1	1.978	2.082	0.218	9.562
19	Y2-1-2	1.547	1.644	0.177	9.263
20	Y2-1-3	1.363	1.42	0.162	8.763
21	Y2-2-1	1.682	1.882	0.196	9.626
22	Y2-2-2	1.474	1.569	0.167	9.395
23	Y2-2-3	1.302	1.42	0.14	10.117
24	Y2-3-1	1.883	2.023	0.208	9.746
25	Y2-3-2	1.486	1.614	0.169	9.525
26	Y2-3-3	1.288	1.407	0.145	9.686
27	D1-1-1	8.444	8.609	0.625	13.774
28	D1-2-1	7.58	8.169	0.512	15.957
29	D1-3-1	9.953	10.881	0.673	16.159
30	PM1	0.913	0.95	0.101	9.368
31	PM2	0.713	0.871	0.107	8.115
32	PM3	0.659	0.816	0.101	8.112
33	L1-1-1	6.124	6.375	0.58	10.99
34	L1-1-2	4.036	4.025	0.375	10.738
35	L1-1-3	2.528	2.656	0.265	10.007
36	L1-2-1	9.647	9.52	0.944	10.09
37	L1-2-2	6.075	6.061	0.641	9.454
38	L1-3-1	9.174	9.176	0.875	10.488
39	L2-1-1	24.679	22.028	1.902	11.583
40	L2-2-1	12.141	11.622	1.013	11.471

41	L2-3-1	7.418	7.092	0.69	10.276
42	C1-1-4	3.191	3.755	0.328	11.455
43	C1-1-2	2.009	3.358	0.195	17.209
44	C1-1-3	1.261	2.96	0.134	22.112
45	C1-2-1	3.378	3.847	0.348	11.066
46	C1-2-2	1.71	3.45	0.165	20.85
47	C1-2-3	1.118	2.811	0.125	22.447
48	C1-3-1	3.419	3.88	0.358	10.848
49	C1-3-2	2.31	3.397	0.228	14.901
50	C1-3-3	1.401	3.252	0.128	25.436
51	1-1	2.231	2.443	0.251	9.738
52	1-2	1.169	1.335	0.159	8.386
53	1-3	0.577	0.679	0.098	6.94
54	2-1	2.404	2.662	0.267	9.97
55	2-2	1.726	1.915	0.199	9.631
56	2-3	0.969	1.108	0.129	8.582
57	3-1	2.841	2.993	0.289	10.352
58	3-2	2.433	2.558	0.258	9.9
59	3-3	1.715	1.903	0.209	9.085
60	G1-1-1	2.394	2.6	0.25	10.398
61	G1-1-2	1.938	2.162	0.202	10.726
62	G1-1-3	1.634	1.777	0.174	10.199
63	G1-2-1	2.728	2.812	0.265	10.63
64	G1-2-2	1.179	1.401	0.149	9.392
65	G1-2-3	0.475	0.605	0.082	7.376
66	G1-3-1	3.3	3.261	0.311	10.483
67	G1-3-2	0.952	1.065	0.121	8.833
68	G1-3-3	0.504	0.618	0.085	7.294
69	PL1-1-1	3.06	3.174	0.288	11.01
70	PL1-1-2	1.869	1.977	0.191	10.343
71	PL1-1-3	1.004	1.168	0.136	8.563
72	PL1-2-1	3.015	3.12	0.275	11.35
73	PL1-2-2	2.105	2.215	0.219	10.135
74	PL1-2-3	1.547	1.766	0.19	9.271
75	PL1-3-1	3.109	3.205	0.287	11.187
76	PL1-3-2	1.771	1.89	0.194	9.721
77	PL1-3-3	1.418	1.572	0.179	8.782
78	PL2-1-1	2.508	2.634	0.244	10.803
79	PL2-1-2	1.913	1.995	0.175	11.383
80	PL2-1-3	1.513	1.574	0.147	10.737
81	PL2-2-1	3.001	3.126	0.286	10.943
82	PL2-2-2	1.599	1.723	0.165	10.414
83	PL2-2-3	1.387	1.505	0.16	9.395
84	PL2-3-1	2.544	2.717	0.259	10.493

85	PL2-3-2	1.737	1.882	0.174	10.837
86	PL2-3-3	1.456	1.473	0.141	10.466
87	PL3-1-1	4.664	4.804	0.407	11.815
88	PL3-2-1	5.541	5.741	0.463	12.392
89	PL3-3-1	7.746	7.798	0.608	12.834
90	PL4-1-1	3.48	3.652	0.307	11.897
91	PL4-2-1	3.871	4.079	0.34	12.011
92	PL4-3-1	3.257	3.446	0.313	11.026
93	PL5-1-1	5.156	5.509	0.433	12.732
94	PL5-2-1	6.542	6.441	0.508	12.668
95	PL5-3-1	5.161	5.247	0.422	12.422
96	PL6-1-1	2.766	2.885	0.242	11.942
97	PL6-1-2	2.221	2.301	0.202	11.373
98	PL6-1-3	2.242	2.27	0.202	11.221
99	PL6-2-1	2.755	2.903	0.272	10.655
100	PL6-2-2	1.799	1.908	0.193	9.881
101	PL6-2-3	1.266	1.413	0.165	8.561
102	PL6-3-1	2.931	3.034	0.255	11.88
103	PL1-1-1	4.632	4.67	0.392	11.903
104	PL1-2-1	5.353	5.272	0.429	12.302
105	PL1-2-2	4.573	4.532	0.392	11.566
106	PL1-3-1	4.522	4.562	0.419	10.883
107	PL1-3-2	4.422	4.503	0.426	10.578
108	PL1-3-3	3.862	4.017	0.412	9.746
110	S1-1-1	3.321	3.421	0.314	10.882
111	S1-1-2	3.201	3.323	0.315	10.557
112	S1-1-3	2.415	2.539	0.234	10.864
113	S1-2-1	3.179	3.298	0.316	10.444
114	S1-2-2	2.951	3.031	0.289	10.494
115	S1-2-3	1.96	2.081	0.194	10.748
116	S1-3-1	3.149	3.293	0.312	10.556
117	S1-3-2	2.881	3.059	0.301	10.17
118	S1-3-3	2.449	2.486	0.243	10.216
119	S2-1-1	3.116	1.274	0.143	8.896
120	S2-1-2	2.589	3.223	0.316	10.188
121	S2-1-3	1.157	2.711	0.271	10.013
122	S2-2-1	3.074	3.228	0.317	10.196
123	S2-2-2	2.83	2.931	0.291	10.068
124	S2-2-3	1.423	1.597	0.162	9.862
125	S2-3-1	3.116	3.242	0.326	9.944
126	S2-3-2		3.154	0.304	10.359
127	S2-3-3	1.59	1.751	0.166	10.563

注：编号代表不同土地利用类型下不同采样点不同深度的土壤样品，采样时间为 2020 年 1 月，所有样品自然晾干，使用元素分析仪测试。其中有机碳过 120 目筛以及酸化（优

级纯盐酸)去除无机碳后进行上机测试,总碳和总氮过 120 目筛后直接使用锡舟包样上机测试。

附录 2: 2020 年普定站样地植被调查数据

序号	物种	高度 (m)	胸径 (cm)
1	香椿	13.5	24.75
2	翅荚香槐	2.7	1.73
3	女贞	4.1	3.55
4	喜树	4	2.4
5	滇楸	8.8	13
6	香椿	2.8	1.34
7	安坪十大功劳	1.5	1.27
8	乌桕	2.9	1.5
9	香椿	5.7	4.08
10	安坪十大功劳	1.8	1.8
11	女贞	5.8	4.53
12	香椿	2.6	1.38
13	女贞	1.9	1
14	女贞	3.8	1.96
15	香椿	11.5	12.21
16	女贞	4.8	3.02
17	小蜡	6	5.43
18	香椿	8.2	5.4
19	朴树	8.5	6.23
20	朴树	6.5	4.18
21	异叶鼠李	2.1	1
22	朴树	8	6.02
23	安坪十大功劳	1.8	2.15
24	漆树	7	4.36
25	翅荚香槐	4.3	2.3
26	安坪十大功劳	1.5	1.27

27	香椿	3.2	1.5
28	小果润楠	7	5.08
29	梓树	7	8.2
30	异叶鼠李	2	1
31	构树	2	1.5
32	女贞	9.2	9.06
33	李子	2.2	3.09
34	翅荚香槐	13	9.8
35	小蜡	4.5	3.83
36	朴树	2	1.5
37	女贞	0.5	8.23
38	女贞	4.5	2.3
39	桑树	4.8	4.7
40	桑树	4.8	2
41	桑树	5.8	8.9
42	油桐	3.7	3.94
43	漆树	6.5	5.09
44	石延枫	6.5	1.5
45	李子	3	5.18
46	女贞	4	4.7
47	构树	7	10.85
48	安坪十大功劳	2.8	2.4
49	朴树	5	5.6
50	李子	3	2
51	翅荚香槐	3.5	1.2
52	石延枫	2	1.2
53	朴树	2.5	2.5
54	安坪十大功劳	1.5	1.27
55	安坪十大功劳	2.8	2.4

56	女贞	5	2.95
57	女贞	4	2.35
58	女贞	3.5	1.5
59	女贞	9	10.2
60	安坪十大功劳	2.5	2.1
61	朴树	2	2.3
62	朴树	5	3.25
63	安坪十大功劳	2.5	2.1
64	安坪十大功劳	2.5	2.1
65	安坪十大功劳	2.5	2.1
66	翅荚香槐	5.5	3.96
67	女贞	5	5.32
68	棕榈	3.4	10
69	女贞	5	2.55
70	女贞	6	3.5
71	女贞	8	9.75
72	安坪十大功劳	1.8	1.5
73	安坪十大功劳	1.8	1.5
74	安坪十大功劳	1.8	1.5
75	朴树	4	2.6
76	楝树	5.3	2.85
77	榔榆	3.5	2.1
78	榔榆	3	2.2
79	榔榆	4	2.3
80	朴树	2	1.1
81	构树	5	6.8
82	小蜡	3	1.6
83	楝树	5.5	4.8

84	安坪十大功劳	1.8	1.5
85	异叶鼠李	3	1.2
86	女贞	2	1.5
87	朴树	2	1.1
88	女贞	5	3.4
89	女贞	4	2.65
90	朴树	7	5.5
91	小蜡	7	5.25
92	小蜡	3.3	1.8
93	女贞	5.5	3.35
94	朴树	4	2.8
95	马桑	3.8	3.1
96	马桑	3.8	3.1
97	马桑	3.8	3.1
98	马桑	3.8	3.1
99	马桑	3.8	3.1
100	朴树	5.6	4.9
101	女贞	6	4.05
102	香椿	11	8.52
103	女贞	5	3.7
104	女贞	5	1.4
105	竹叶椒	3.5	1.9
106	梓树	2.8	3.25
107	盐肤木	4	3
108	盐肤木	2.3	2.5
109	盐肤木	2.3	2.5
110	盐肤木	2.3	2.5
111	翅荚香槐	2.5	2.1
112	滇楸	10	15.3

113	女贞	6.5	3.4
114	安坪十大功劳	1.6	1.4
115	安坪十大功劳	1.6	1.4
116	安坪十大功劳	1.6	1.4
117	喜树	2	1.1
118	喜树	9	6.85
119	桑树	5	5.68
120	翅荚香槐	2	1.1
121	李子	2	2.2
122	竹叶椒	5	2.25
123	滇楸	4	6.6
124	滇楸	15	15.5
125	滇楸	7.8	7.5
126	翅荚香槐	5.2	2.2
127	喜树	6	3
128	喜树	2.7	1.5
129	喜树	5.8	3.95
130	小蜡	4	2.5
131	安坪十大功劳	1.6	1.5
132	朴树	4.5	2.6
133	滇楸	15	25
134	朴树	2.5	1.2
135	喜树	10.5	7.7
136	喜树	16	18.05
137	滇楸	15.2	18.5
138	朴树	3.6	2
139	白桦	2.5	1.2
140	油桐	2	3.6
141	滇楸	15.8	28.9

142	大果冬青	3.3	1.6
143	朴树	5	4.05
144	朴树	3.9	3.75
145	小蜡	3.1	2.05
146	翅荚香槐	5	2.4
147	小蜡	3.1	2.05
148	小蜡	2	1.5
149	大果冬青	3.3	1.6
150	小蜡	3.1	2.05
151	翅荚香槐	1.9	1
152	滇楸	9.5	12.5
153	云实	15	7
154	云实	15	7
155	朴树	4	4.8
156	女贞	8	7.3
157	朴树	4	2.4
158	加杨	17.5	36.35
159	加杨	16	69
160	云实	3.7	2.18
161	云实	3.7	2.18
162	云实	3.7	2.18
163	喜树	4	2
164	喜树	4.5	3.08
165	云实	3.3	1.2
166	云实	3.3	1.2
167	香椿	4	2.27
168	盐肤木	2.6	1.49
169	喜树	5.6	4.16
170	喜树	3.6	2.27

171	盐肤木	5.5	5.18
172	翅荚香槐	4.7	4.33
173	云实	3.5	1.4
174	云实	3.5	1.4
175	云实	3.5	1.4
176	云实	3.5	1.4
177	楝树	2.6	1.13
178	马桑	2.1	2.12
179	喜树	4.4	3.02
180	盐肤木	5	3.43
181	盐肤木	5.2	4.48
182	盐肤木	3.9	2.78
183	乌柏	7.8	10.22
184	梓树	4.6	17.97
185	构树	2.9	2.9
186	朴树	3.1	1.16
187	朴树	4.4	1.19
188	云实	2.6	1.58
189	构树	2.4	2.5
190	构树	2.4	2.5
191	喜树	4.7	3.25
192	喜树	3.8	2.57
193	朴树	3.1	2.92
194	翅荚香槐	2.6	1.99
195	翅荚香槐	2.2	1.38
196	香椿	2.5	1.71
197	山杨	2.2	1.19
198	喜树	3.4	1.8
199	喜树	2.9	1.37

200	山杨	3.5	4.29
201	山杨	2.6	1.42
202	山杨	5.2	3.85
203	山杨	4.2	2.94
204	乌柏	4.4	3.43
205	山杨	7.5	8.06
206	山杨	7.3	8.62
207	山杨	2.1	1.32
208	山杨	4.1	2.01
209	喜树	2.3	1.48
210	翅荚香槐	2.6	1.36
211	朴树	3.1	1.72
212	香椿	2.8	2.53
213	香椿	1.9	1.29
214	香椿	4.4	4.77
215	香椿	2	1.68
216	香椿	4.4	3.17
217	喜树	6	5.62
218	喜树	2.6	5.62
219	翅荚香槐	4.1	3.32
220	香椿	2.9	2.72
221	小蜡	3.1	1.79
222	盐肤木	1.7	1.58
223	喜树	5.7	5.99
224	小蜡	2.4	1
225	油桐	3.6	2.67
226	喜树	3.8	2.02
227	山杨	5.5	4.41
228	山杨	4.3	2.17

229	朴树	2.7	1
230	山杨	8.2	6.49
231	山杨	8.2	6.56
232	香叶	2.4	1
233	山杨	3.3	2.74
234	山杨	5.5	3.85
235	山杨	2.6	1.25
236	翅荚香槐	5.2	2.8
237	构树	5.1	3.74
238	蔓胡颓子	5.2	1.4
239	山杨	6.6	5.28
240	翅荚香槐	6.7	11.21
241	翅荚香槐	5.7	5.4
242	翅荚香槐	4.8	5.36
243	白桦	3.2	6.47
244	安坪十大功劳	1.9	1.7
245	安坪十大功劳	1.9	1.7
246	翅荚香槐	9	7.04
247	白桦	4	3.23
248	白桦	2.4	5.36
249	白桦	7	2.58
250	白桦	7	2.58
251	白桦	7	2.58
252	山杨	14.6	33.94
253	鹅掌柴	3.8	4.17
254	鹅掌柴	2.7	2.9
255	鹅掌柴	2	2.17
256	鹅掌柴	1.7	3.82
257	鹅掌柴	2.2	2.36

258	鹅掌柴	2.3	2.66
259	鹅掌柴	2.4	2.39
260	鹅掌柴	2.4	2.39
261	鹅掌柴	2.4	2.39
262	鹅掌柴	2	1.6
263	朴树	4.8	6.66
264	小果润楠	3.6	3.52
265	小果润楠	3.6	3.52
266	小果润楠	3.6	3.52
267	八角枫	3.5	2.69
268	鹅掌柴	2.3	2.85
269	鹅掌柴	1.9	1.7
270	八角枫	2	1.98
271	八角枫	3	2.3
272	八角枫	2	1.2
273	油麻藤	15	15.7
274	八角枫	4.1	2.88
275	八角枫	1.8	2.08
276	川钓樟	4	3.35
277	八角枫	3.2	2.08
278	八角枫	3.2	2.07
279	八角枫	3.7	2.49
280	山杨	9.3	10.42
281	山杨	8.2	7.58
282	山杨	9.3	7.44
283	朴树	5.6	5.75
284	朴树	4.5	3.28
285	香叶	5.4	2.64
286	香叶	5.4	2.64

287	香叶	5.4	2.64
288	翅荚香槐	2.8	1.57
289	翅荚香槐	7	7.65
290	翅荚香槐	6.5	6.22
291	香椿	4.3	3.86
292	安坪十大功劳	1.7	1.6
293	翅荚香槐	2.3	1.64
294	香椿	3.8	3.08
295	石岩枫	2.2	1.3
296	石岩枫	2	1.6
297	石岩枫	2	1.6
298	石岩枫	2	1.6
299	石岩枫	2	1.6
300	石岩枫	2	1.6
301	石岩枫	2	1.6
302	石岩枫	2	1.6
303	朴树	2.4	1.18
304	乌柏	2.3	1.8
305	翅荚香槐	2.2	1
306	盐肤木	2.4	2.77
307	李子	2.7	6.4
308	李子	2.5	5.1
309	香椿	2.7	3.4
310	梨树	5.4	6.4
311	李子	2.7	3.35
312	李子	2.7	3.35
313	李子	2.7	3.35
314	李子	2.9	5.5
315	李子	2.9	5.5

316	梨树	3.5	4.8
317	梨树	3.1	5.02
318	梨树	3.1	5.02
319	李子	2.4	2.6
320	异叶鼠李	2.3	2.5
321	梨树	3.1	4.4
322	李子	2.6	2.45
323	翅荚香槐	2.4	1.75
324	小果润楠	3.3	2.45
325	梨树	2.0	3.6
326	小果润楠	3.3	2.45
327	梨树	4.0	7.1
328	李子	2.1	2.42
329	李子	1.4	1.98
330	李子	2.2	6.4
331	李子	1.8	3
332	李子	2.0	3.7
333	李子	2.3	3.04
334	香椿	3.7	1.64
335	梨树	3.1	3.74
336	梨树	3.1	5.2
337	梨树	2.4	3.87
338	梨树	2.4	3.87
339	梨树	2.4	3.87
340	香椿	2.5	1.43
341	朴树	3.6	1.8
342	朴树	3.7	2.24
343	楸树	3.0	3.35
344	香椿	2.8	1.53

345	朴树	3.6	2.23
346	女贞	1.8	1.17
347	安坪十大功劳	1.6	1.38
348	安坪十大功劳	1.8	1.33
349	大果冬青	2.9	2.25
350	安坪十大功劳	1.5	1.28
351	安坪十大功劳	3.0	3.35
352	安坪十大功劳	1.2	1.96
353	女贞	4.6	2.7
354	香椿	3.2	1.57
355	安坪十大功劳	2.0	2.04
356	石岩枫	3.0	1.1
357	女贞	7.8	4.3
358	女贞	7.8	1.62
359	翅荚香槐	6.5	2.98
360	异叶鼠李	2.3	1.4
361	女贞	3.3	1.84
362	石岩枫	2.2	1.35
363	枇杷	1.6	1.04
364	安坪十大功劳	2.2	3.01
365	漆树	4.1	2.74
366	漆树	2.5	2.12
367	楝树	5.2	3.11
368	梧桐	2.4	2.77
369	女贞	5.3	3.78
370	异叶鼠李	1.5	1.43
371	珍珠荚蒾	1.7	1.43
372	构树	2.1	2.7

373	楝树	1.8	1.82
374	南蛇藤	1.8	1.19
375	盐肤木	1.8	1.52
376	安坪十大功劳	1.7	1.34
377	盐肤木	2.7	1.41
378	香椿	7.4	6.53
379	安坪十大功劳	1.8	2.06
380	乌柏	3.3	1.83
381	翅荚香槐	2.6	1.4
382	小蜡	5.7	4.74
383	小蜡	6.2	6.72
384	小蜡	3.4	3.47
385	香椿	4.1	2.73
386	朴树	2.8	1.33
387	异叶鼠李	2.3	1.4
388	异叶鼠李	2.3	1.4
389	异叶鼠李	2.3	1.4
390	异叶鼠李	2.3	1.4
391	异叶鼠李	2.3	1.4
392	异叶鼠李	2.3	1.4
393	安坪十大功劳	1.8	2.06
394	安坪十大功劳	1.8	2.06
395	小蜡	5.7	4.74
396	樱桃	1.8	1.18
397	香椿	2.4	1.7
398	安坪十大功劳	1.8	1.2
399	安坪十大功劳	1.8	1.2
400	马桑	2.6	2

401	盐肤木	1.5	1.2
402	盐肤木	2.16	1.9
403	香椿	2.4	2.55
404	大果冬青	2.6	2.2
405	喜树	1.2	2
406	朴树	3.8	2.89
407	喜树	1.9	1.06
408	喜树	5.9	4.81
409	喜树	5.9	4.81
410	喜树	5.9	4.81
411	楸树	3.2	3.59
412	樱桃	3.7	3.72
413	喜树	3.5	2.44
414	朴树	3.1	1.78
415	喜树	13.5	10.6
416	喜树	2.4	1.2
417	香椿	2.1	1.5
418	朴树	3.8	3.27
419	女贞	1.6	1.03
420	喜树	4.0	3.4
421	翅荚香槐	4.6	3.85
422	朴树	2.1	1.37
423	蔓胡颓子	1.9	1.15
424	朴树	3.2	2.41
425	喜树	8.8	7.7
426	楸树	4.7	4.55
427	女贞	6.2	3.8
428	香椿	2.8	2.3
429	山杨	15	25

430	山杨	6.1	5.6
431	山杨	8.2	6.09
432	香椿	3.9	2.71
433	山杨	3.7	3.02
434	翅荚香槐	2.7	1.8
435	翅荚香槐	3.3	3.1
436	翅荚香槐	5.6	4.4
437	朴树	3.1	3.43
438	小果润楠	5.2	7.7
439	小果润楠	5.2	7.7
440	小果润楠	5.2	7.7
441	小果润楠	5.2	7.7
442	朴树	4.5	4
443	小果润楠	6.2	5.21
444	小果润楠	6.2	5.21
445	八角枫	1.58	2.49
446	朴树	3.7	3.29
447	鹅掌柴	2.1	1.65
448	华南云石	1.5	2.4
449	鹅掌柴	2.1	1.65
450	枇杷	4.2	7.3
451	鹅掌柴	2.5	3.04
452	大果冬青	6.4	3.75
453	大果冬青	6.4	3.75
454	大果冬青	6.4	3.75
455	大果冬青	6.4	3.75
456	大果冬青	6.4	3.75
457	大果冬青	6.4	3.75
458	翅荚香槐	13.4	32

459	翅荚香槐	7.6	4.9
460	翅荚香槐	7.6	4.9
461	构树	3.8	3.7
462	构树	1.8	3.2
463	石岩枫	1.6	1.72
464	翅荚香槐	3	2.23
465	石岩枫	1.6	1.72
466	石岩枫	1.6	1.72
467	安坪十大功劳	1.6	1.42
468	安坪十大功劳	1.3	1
469	香椿	2.4	2.01
470	香椿	2.3	2.02
471	朴树	6.2	6.43
472	朴树	6.2	6.43
473	朴树	6.2	6.43
474	翅荚香槐	3.2	1.92
475	构树	3.01	2.8
476	香椿	3.2	1.7
477	朴树	6.4	8
478	喜树	6.8	3.42
479	喜树	6.8	3.42
480	喜树	6.8	3.42
481	云石	2.9	11.51
482	云石	2.9	11.51
483	云石	2.9	11.51
484	云石	2.9	11.51
485	云石	2.9	11.51
486	构树	2.8	3.01
487	构树	3.1	4.22

488	山杨	6.4	4.3
489	山杨	7.9	7.3
490	翅荚香槐	3.6	2.8
491	石岩枫	1.4	1.2
492	石岩枫	1.4	1.2
493	石岩枫	1.4	1.2
494	石岩枫	1.4	1.2
495	石岩枫	1.4	1.2
496	石岩枫	1.4	1.2
497	石岩枫	1.4	1.2
498	香椿	2.9	1.85
499	漆树	3.7	2.8
500	漆树	4.8	4.4
501	山杨	3.7	2.39
502	山杨	9.7	12.9
503	山杨	3.7	2.39
504	山杨	9.7	12.9
505	山杨	3.9	1.81
506	女贞	4.9	4.5
507	云石	3.6	1.75
508	山杨	8.3	9.5
509	鹅掌柴	2.5	2.25
510	香椿	3	2.33
511	翅荚香槐	2.5	1.59

注：调查地点为普定站退耕地自然恢复永久样方

附录 3：普定站通量与气象观测仪器信息

观测系统	测定要素	仪器型号	制造商	安装位置
涡度相关	CO ₂ 、H ₂ O 浓度	LI-7500A	Li-Cor	13.6 m
	三维超声风速	WindMaster Pro	Gill	13.6 m
	温湿度	HMP45A/D	Vaisala	1.5 m
气象站	风向	WAV151	Vaisala	10 m
	风速	WAA151	Vaisala	10 m
	降雨量	RG13	Vaisala	0.7 m
	总辐射	CMP11	kipzonen	1.5 m
	净辐射	QMN101	Vaisala	1.5 m
	土壤热通量	HFP01SC	Hukseflux	-5 cm