

中国北方草地植物群落碳、氮元素组成空间变化 及其与土壤地球化学变化的关系

程建中^{1,2}, 李心清^{1*}, 刘钟龄³, 胡璐^{1,2}, 黄代宽^{1,2}

(1. 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, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 内蒙古大学 生命科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要: 碳、氮元素是土壤中的关键元素。在我国黄土高原北部 - 宁夏中东部处于荒漠化初期阶段的草地中, 土壤的碳、氮元素组成出现了异乎寻常的特征, 即相对于碳含量, 氮含量异常偏低。认识造成这一现象的原因对我国北方草地的保护和重建具有重要意义。植被的输入是土壤中碳、氮元素组成的最为重要的控制因素之一。为认识植被碳、氮含量的空间变化对上述现象产生的贡献, 对包括草地碳、氮异常区在内的区域进行了沿线植物群落的化学组成研究。结果表明: 1. 植物群落平均碳含量约为 40% ~ 50%, 不同植物群落类型碳含量以苦豆子、达乌里胡子枝群落最高 (44.225%), 蛛丝蓬、骆驼蓬群落最低 (35.516%)。绝大多数植物群落平均氮含量约为 2% ~ 4%, 不同植物群落类型含氮量以猪毛菜、星状角果藜群落最高 (4.482%), 蛛丝蓬群落最低 (1.356%); 2. 植物群落生物量空间分布与对应降雨量变化趋势一致, 说明降雨量是限制群落地理分布的关键因子; 3. 植物群落与土壤 C/N 比值随纬度呈现不一致的变化规律, 相关分析表明, 两者呈现统计学上的显著负相关关系, 相关系数为: $r = -0.392$ ($P < 0.05$, $n = 32$)。上述结果表明, 在研究地区荒漠化初期阶段的草地中, 植被输入不是引起该区域土壤 C/N 异常升高的原因。

关键词: 土地退化; 干旱草原; 植物群落; 土壤 C、N 含量; C/N 比值

中图分类号: P595 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2008)03-0265-10

Spatial variation of C and N contents of plant communities in the steppe of north China: Implication for the abnormal C/N ratio in the surface soil

CHENG Jian-zhong^{1,2}, LEE Xin-qing^{1*}, LIU Zhong-ling³, HU Lu^{1,2} and HUANG Dai-kuan^{1,2}

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China

Abstract: Carbon (C) and nitrogen (N) are crucial elements to soil. The ratio of the elements (C/N) is found to be extraordinarily high in the incipient stage of soil degradation in the northern Loess Plateau and central and east Ningxia, north China. The understanding of the causes of the abnormal ratio is of importance to prevention and rehabilitation of soil degradation in the arid and semiarid grassland. Input from vegetation is the dominant source to soil carbon and nitrogen. Therefore, the spatial variations of C and N contents in plant communities along the transect with the abnormal soil C/N ratio are studied. Average C content of the plant communities ranges from 40% to 50%, depending on the species composition in a community. The highest C content was found in the community of *Sophora alopecuroides* and *Lepedeza davurica*, which is 44.225%, while the lowest level in the community of *Micropeplis arachnoides* and *Peganum harmala* as 35.516%. N in most of the plant communities averages about 2% - 4%, and the highest content, 4.482%, was found in the community of *Salsola collina* and *Bassia dasyphylla*, while the lowest N, 1.356%, in *Micropeplis arachnoides*. The spatial variation of the biomass

收稿日期 (Received): 2007-08-30; 改回日期 (Revised): 2007-11-19; 接受日期 (Accepted): 2008-02-27

基金项目: 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划

作者简介: 程建中 (1983-), 男, 博士研究生, 环境地球化学专业。

* 通讯作者 (Corresponding author): LEE Xin-qing, E-mail: xinqinglee@hotmail.com, Tel: +86-851-5891611

CHENG Jian-zhong et al.: Spatial variation of C and N contents of plant communities

production correlates significantly with that of precipitation, suggesting that precipitation is a main constraint on the plant productivity. Opposite to the spatial variation of C/N in the surface soil, C/N in the plant communities changes in an statistically reverse trend ($r = -0.392$, $P < 0.05$, $n = 32$). This fact indicates that the abnormal C/N ratio in the early stages of soil degradation is not caused by the input of the vegetation.

Key words: soil degradation; steppe; plant community; soil C and N content; C/N ratio

0 引言

荒漠化是世界上最严重的环境问题之一。其产生和发展不仅造成可利用土地数量的减少,同时导致土地生产力的下降和土地资源的丧失。据测算,荒漠化地区每年因风蚀损失的土壤有机质及氮、磷、钾等达 5590×10^4 t,折合 2.7×10^8 t 标准化肥^[1]。其中在我国黄土高原北部-宁夏中东部地区,由于地表沉积物中沙物质丰富,生态环境十分脆弱,再加上人类长期的不合理地利用资源,长期地过度放牧与农垦,植被累遭破坏,土地的荒漠化已经成为该地区继水土流失以后又一个比较严重的环境问题,引起了广泛的关注^[2]。

近年来,全球气候变化与土地沙漠化之间存在的密切关系以及碳、氮生物地球化学循环在全球气候变化研究中的核心地位,使沙漠化过程中土壤碳、氮动态成为相关研究领域的热点问题^[3]。众所周知,影响土壤碳、氮元素变化的因子非常复杂,包括植被、气候、母质等众多因素。其中植被的输入是土壤碳、氮元素最为重要的控制因子之一,这是因为植物群落与土壤地球化学变化总是相互联系、互相制约:一方面,植被具有保护和改善土壤的能力,由于植被和枯枝落叶层的覆盖,可以减少雨水对土壤的直接冲击,减少土壤侵蚀,保持土地生产力^[4-5];同时生物分解过程能够将死去的有机质和垃圾转化为碎屑或生物可利用的养分归还给土壤,改善土壤物理化学性质,不断提高土壤肥力^[6-7]。另一方面,土壤养分对植物的生长起着关键性的作用,直接影响植物群落的组成与生理活力,决定着生态系统的结构、功能和生产力水平^[8-9]。

目前有关植物群落与土壤碳、氮元素关系的研究都主要局限于特定的某个区域内植被恢复过程对土壤有机碳和全氮积累的影响^[10-12]。在大尺度空间范围内,有关植物群落碳、氮营养元素与土壤地球化学变化关系的报道较少。然而在我国北方干旱、半干旱荒漠化初期阶段的草地中,前期研究发现土壤中碳、氮元素出现了异乎寻常的特征。即相对碳含

量来讲,氮含量偏低,该研究区域 C/N 平均比值在 28 左右,土壤 C/N 比值出现显著偏高的现象。为了认识植被碳、氮含量的空间变化对上述现象产生的贡献,我们对包括草地碳、氮异常区在内的区域进行沿线植物群落化学组成的研究,期望能认识造成此现象的原因。这样不仅可以解决在大尺度空间范围内,植物群落类型的变化与土壤地球化学的关系,同时对于我国北方草地的保护和重建也具有重要现实意义,而且还为进一步研究该区域植被-土壤之间的碳、氮生物地球化学循环提供基础性资料。

1 材料与研究方法

1.1 研究区域自然概况

研究区域位于中国的黄土高原北部-宁夏中东部地区。全年大部分时间受西风环流的支配,北方大陆气团控制时间较长,同时远离海洋,形成较典型的大陆性气候,处于中温带—暖温带、半干旱—干旱区的过渡地带。其基本气候特点:干旱少雨,风大沙多,日照充足,蒸发强烈,气温年、日较差大,无霜期短而多变,干旱、冰雹、沙尘、霜冻等灾害性天气比较频繁。

采样点广泛分布于甘肃平凉市,宁夏固原市、海原县、同心县、盐池县,内蒙古鄂托克前旗和鄂托克旗等区域(图 1)。此采样带年平均降雨量在 220.42~438.95 mm 之间,降雨较少,除平凉市和固原市因位置偏南夏季风较强而导致年降雨量大于 400 mm 外,其他各点年降雨量均小于 400 mm 且分布不均匀,其中 60% 以上的降雨集中在 7~9 月。对应地点的年平均温度在 6.15~8.99 °C 之间,温度较低且变幅相对比较平缓(图 2)。该区域主要植物有本氏针茅(*Stipa bungeana*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、黄蒿(*Artemisia scoparia*)等,大部分地区呈现出植被稀疏、覆盖度小、草丛低矮、层次结构简单等特点。

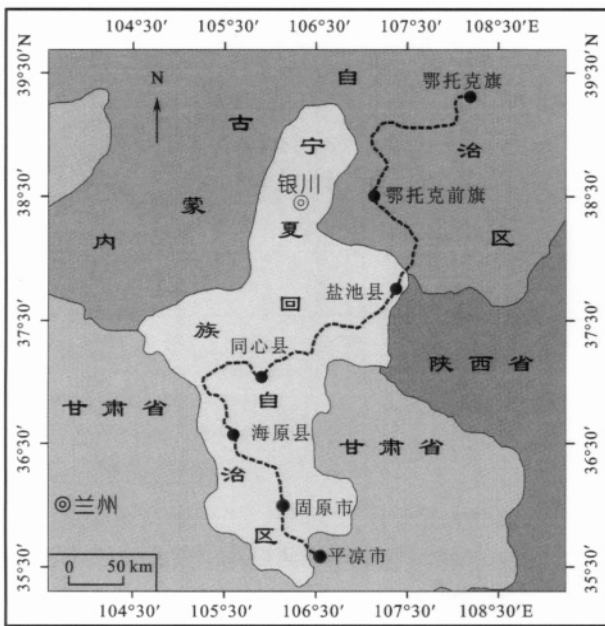


图 1 中国黄土高原北部 - 宁夏中东部采样路线图

Fig. 1 Sampling transect in the Loess Plateau and central and east Ningxia, north China

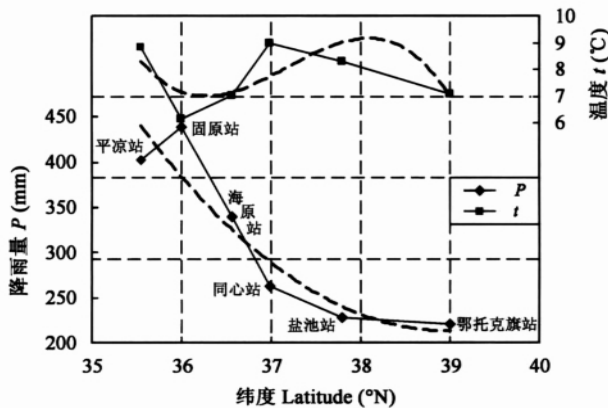


图 2 沿采样路线年平均降雨量和年平均温度

Fig. 2 Spatial variation of annual average temperature and precipitation along the transect

1.2 研究方法

1.2.1 样地的设置

采样点始于甘肃平凉市的西北部 (35°38'48"N, 106°28'57"E), 每相隔 2' ~ 3' 纬度设置 1 个采样点, 向北直至内蒙古的鄂托克旗 (39°16'5"N, 108°2'22"E)。整个样带全长 430 km, 分布在东经 104°与 109°之间 (图 1)。在每个样点采样的过程中同时对植物群落进行观察记载, 用全球定位系统 (GPS) 确定采样点的经纬度, 样地选择尽量远离道路、城镇、村落以及人为干扰严重的地区。

1.2.2 植物生物量的测定

生物量 (地上和地下) 于 2006 年 8 月植物生长最旺盛时测定。大多数样点采用样线法 (10 m × 20 cm) 获取植被地上和地下部分, 少数采样点由于植被覆盖度低且矮小故采用样方法 (1 m × 1 m) 收集。在每条样带范围内或者单个样方内, 将全部的植物连根掘出, 按种类分别称重后装入纸袋。样品带回实验室后, 拣出砂石、植物残体等异物后用清水反复清洗根部、晾干。在 80 °C 恒温下烘干至恒重, 然后在电子天平 (SPN1501F) 上称重, 进而计算各样点的生物量 (g/m²)。

1.2.3 土壤采集

在采集过植物群落生物量的样地上, 用土钻取 3 个样点 (采用“V”字形法) 混合为 1 个土壤样品, 均取表层土壤 (0 ~ 15 cm) 装入布袋, 风干后进行室内分析测定。

1.2.4 分析方法

植物样品烘干后, 在各个群落样点中, 先选取有代表性的根、茎、叶 (根、茎、叶的选择主要依据各器官在植株中所占比重), 再按不同物种生物量 (干重) 在群落中的比例进行混合磨碎后过 100 目筛, 采用元素分析仪 (Element Analyzer PE2400 II) 测定其 C、N 含量以及 C/N 比值, 精确度为 0.001, 元素含量测定误差优于 ±0.3%。

分析土壤 C、N 含量时, 样品先在 50 °C 下烘干、碾细并过 140 目筛, 同时剔除残留植物根茎以及大颗粒物等杂质, 然后经过 10% 盐酸酸化 12 h 除去无机碳, 并用蒸馏水洗至溶液的 pH 呈中性, 烘干后的土壤样品同样采用元素分析仪测定其 C、N 含量以及 C/N 比值 (所有的分析和测试工作都在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完成)。

2 结果与分析

2.1 植物群落碳、氮元素组成特征

调查的 32 个植物群落平均碳含量范围为 35.354% ~ 44.207%。其中 71.9% 的植物群落平均碳含量在 40% ~ 45% 之间, 28.1% 群落碳含量在 35% ~ 40% 之间, 可见大多数植物群落的碳含量在 40% ~ 45% 左右。以苦豆子 (*Sophora alopecuroides*)、达乌里胡枝子群落的平均碳含量最高 (44.225%), 广泛分布于宁夏盐池县与内蒙古鄂托克前旗的交汇

处。蛛丝蓬 (*Micropeplis arachnoides*) 和骆驼蓬群落的碳含量最低 (35.516%)，出现在宁夏海原县与同心县的交界处。此外，碳含量较高的植物群落有本氏针茅、糙隐子草、多叶棘豆 (*Oxytropis myriophylla*) 群落；星毛萎陵菜 (*Potentilla acaulis*)、黄蒿、本氏针茅群落；白草 (*Pennisetum centrasiaticum*)、皂角 (*Gleditsia heterophylla*) 群落；白草、本氏针茅群落；芨蒿 (*Artemisia giraldii*)、白草群落，它们的平均碳含量分别为 44.202%、44.193%、43.716%、43.675% 和 43.412%。

统计的 32 个植物群落平均氮含量范围 1.356% ~ 4.482%，其中 84.4% 的植物群落平均氮含量在 2% ~ 4% 之间，12.5% 的群落氮含量小于 2%，仅有 3.1% 的群落氮含量大于 4%，可见大多数植物群落的氮含量在 2% ~ 4% 之间。以猪毛菜、星状角果藜 (*Bassia dasyphylla*) 植物群落的平均氮含量最高 (高达 4.482%)，此群落位于宁夏盐池县与内蒙古鄂托克前旗的接壤处。蛛丝蓬植物群落的平均氮含量最低 (仅为 1.356%)，广泛分布于宁夏同心县境内。除此以外，氮含量较高的植物群落有芨蒿、本氏针茅、骆驼蓬群落；黄蒿、骆驼蓬群落；猪毛菜群落；滨藜 (*Atriplex patens*)、猪毛菜、赖草 (*Leymus secalinus*) 群落；糙隐子草、沙葱 (*Allium mongolicum*) 群落，它们的氮含量平均值分别为 3.938%、3.894%、3.744%、3.574% 和 3.511%。

一般植物在干物质中碳含量约占 40%^[13]。本区大多数植物群落碳含量在 40% ~ 45% 左右，含量范围差异不大，群落碳含量属正常水平。氮在植物干物质中一般约占 2% ~ 4%。富集氮的植物主要分布在温带的草原区以及落叶阔叶林区，某些富氮植物的氮含量可达 4% 以上^[14]。本区处于草原、荒漠草原区，大多数植物群落氮含量在 2% ~ 4% 左右，最高的可达 4% 以上，这与前人的研究结果是一致的。

不同地区，植物群落碳、氮含量组成不同 (图 3)。从甘肃平凉市到宁夏固原市一带，植物群落平均碳、氮含量分别为：43.853% 和 2.008%。对比所研究的几个地区，此点却是植物群落碳、氮含量差别最大的区域，即碳含量平均值最高，氮含量最低。当穿过固原市，进入海原县和同心县的周边区域时，平均碳含量分别为 38.734% 和 39.958%，相比固原市一带均略有所降低。平均氮含量

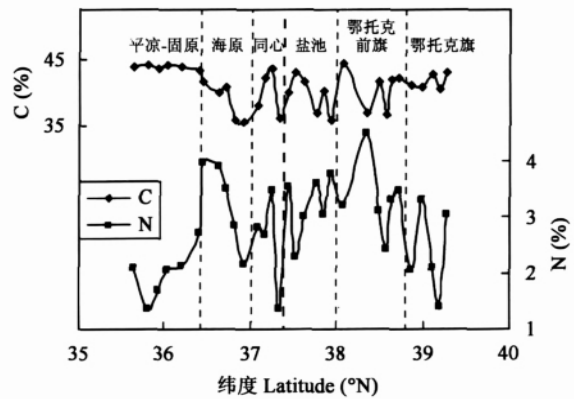


图 3 沿采样路线植物群落平均碳、氮含量空间变化特征
Fig. 3 Average C and N contents of plant communities along the transect

却在两县境内呈上升趋势，分别为 3.259% 和 2.577%。随着纬度北移，平均碳、氮含量基本保持不变，在 37.8°N 的盐池县周围，平均碳、氮含量分别为 39.590% 和 3.192%。当从宁夏盐池县进入内蒙古腹地时，植物群落的平均碳含量一直呈上升趋势，在鄂托克前旗为 40.609%。继续往北，当进入鄂托克旗一带时，平均碳含量高达 41.555%，而平均氮含量却表现出先升高后降低的变化趋势 (3.192% → 3.321% → 2.367%)。

总的来说，整个采样带植物群落碳、氮含量均呈不规则的锯齿状分布，但两者的变化趋势并不一致 (图 3)。统计分析表明，植物群落的碳、氮含量未达到统计学上的显著相关关系 ($r = -0.207$, $P > 0.05$, $n = 32$) (表 1)。这种不一致变化规律可能主要

表 1 植物群落碳、氮含量和碳氮比值与土壤有机碳、氮含量和碳氮比值相关分析

Table 1 Correlation analysis between C, N contents and C/N ratio of the plant communities and those of the surface soil

项目	PTC	PTN	P(C/N)	SOC	STN	S(C/N)
PTC	1					
PTN	-0.207	1				
P(C/N)	0.325	-0.938**	1			
SOC	0.252	-0.512**	0.624**	1		
STN	0.296	-0.464**	0.573**	0.905**	1	
S(C/N)	-0.507**	0.339	-0.392*	-0.278	-0.484**	1

注：“**”表示显著水平为 0.01 ($P < 0.01$) 时，相关极显著，“*”表示显著水平为 0.05 ($P < 0.05$) 时，相关显著。PTC 代表植物群落碳含量，PTN 代表植物群落氮含量，P(C/N) 代表植物群落碳氮比值；SOC 代表土壤有机碳含量，STN 代表土壤氮含量，S(C/N) 代表土壤碳氮比值。

“**”和“*” indicate the significance level of $P < 0.01$ and $P < 0.05$, respectively. PTC, PTN and P(C/N) stand for C content, N content and C/N ratio of the plant communities, respectively; SOC, STN and S(C/N) for organic C content, N content and C/N ratio of surface soil, respectively.

是由于植物群落碳、氮营养元素来源以及元素本身在植物体中不同的转化方式所导致的。

2.2 植物群落生物量的地理分布特征

研究区域内植物群落生物量变化范围较大 ($19.4 \sim 479.5 \text{ g/m}^2$), 平均值为 121.4 g/m^2 。在所调查的植被类型中以本氏针茅、糙隐子草群落生物量最高, 为 479.5 g/m^2 , 分布在甘肃平凉市与宁夏固原市的交界处 (35.8°N), 以黄蒿、骆驼蓬群落的生物量最低, 仅为 19.4 g/m^2 , 分布于宁夏海原县 (36.6°N 附近) 境内 (图 1 和图 4)。

在扣除人为干扰的样地后, 从南到北, 各个地区的平均生物量分别为: 248.4 g/m^2 (平凉 - 固原一带)、 119.2 g/m^2 (海原县)、 132.0 g/m^2 (同心县)、 102.7 g/m^2 (盐池县)、 100.7 g/m^2 (鄂托克旗)。随着纬度的北移, 群落生物量除在同心县略有上升外, 其余各点基本呈现出一直下降的变化趋势。即: 在低纬度带 ($35.6^\circ\text{N} \sim 36.4^\circ\text{N}$) 植物群落生物量较高, 中间纬度带 ($36.5^\circ\text{N} \sim 38.0^\circ\text{N}$) 出现了一个平缓过度区, 高纬度带 ($38.0^\circ\text{N} \sim 39.3^\circ\text{N}$) 生物量又缓慢下降 (图 4)。

结合温度和降雨量资料 (图 2) 分析, 我们对各地区植物群落生物量与对应区域年平均降雨量进行线性回归, 结果为: $B = 0.60P - 38.64$ ($r = 0.897$, $P < 0.05$, $n = 5$) (式中 B 代表群落生物量, P 为年均降雨量), 说明群落生物量与降雨量呈显著正相关关系, 植物群落生物量的变化主要是由于降雨量的分布不均引起的。这与前人的研究结果是比较一致的: 植物群落生物量与气候关系密切^[15-17]。降水通过土壤水分有效性影响地上生物量的时空变化, 而温度通过生长季长度影响地上生物量的时空变化^[18]。

诚然, 植物的生长是受生态因子控制的, 除了与降雨量有关, 生物量还与土壤质地^[19]、土壤资源 (水分有效性、养分有效性) 等有关^[20]。而这些因子在北方干旱、半干旱地区相对来讲还是比较容易满足的, 降雨量才是限制该研究区域植物群落空间变化的关键因子。正是由于降雨量的空间分布规律决定了群落生物量变化特征, 所以植物群落生物量与对应降雨量随着纬度改变具有相对一致的变化趋势。

另外, 值得注意的是, 此次采样位于我国北方荒漠化初期阶段的草原与荒漠草原过渡区域, 而土地荒漠化是自然因素和人为活动综合作用的结果。自然因素主要是指异常的气候条件, 特别是严重的干

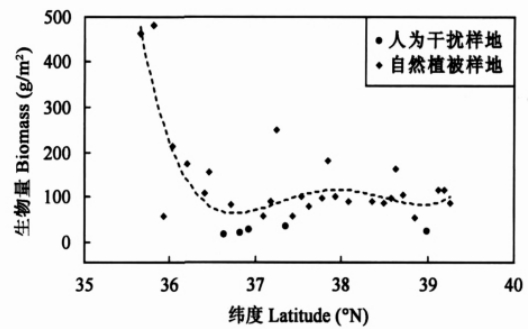


图 4 植物群落生物量空间变化特征

Fig. 4 Spatial variation of biomass production of plant communities along the transect

旱条件, 由此造成植被退化, 风蚀加快, 引起荒漠化。人为因素主要指过度放牧毁掉赖以防止土地退化的植被, 过度种植使土地衰竭, 开垦草地和砍伐森林砍掉赖以固定陆地土壤的树木, 排水不良的灌溉方法使农田变碱^[21]。就中国北方而言, 过度放牧和不适的旱作农业是干旱和半干旱地区发生荒漠化的主要原因。特别需要指出的是 8、10、11、15、29 号样地, 图 4 中圆点从左至右依次代表这 5 块样地。其中 8、10、11 号样地分别为干河旁的撂荒地、斜面坡上的撂荒地和坡腰上的撂荒地, 它们位于海原县境内; 15 号样地为地势平坦的撂荒地, 地处同心县周围; 29 号样地分布于鄂托克旗, 为沙化过的平坦地。由于这 5 块样地均是撂荒或严重沙化过的土地, 因此植物群落的种群组成和结构特征发生了根本性变化, 植被盖度极低, 而且生产力低下, 生物量分别仅为 19.4 g/m^2 、 21.7 g/m^2 、 28.6 g/m^2 、 37.0 g/m^2 和 25.1 g/m^2 。根据荒漠化程度的判断指标: 生物量小于 90.0 g/m^2 的区域均属于土地已经发生了严重荒漠化, 故此 5 块样地均是处于严重荒漠化的地段, 植被稀疏, 盖度低。进一步说明在脆弱的生态环境中进行不合理的人类活动是加速北方土地荒漠化的罪魁祸首。

2.3 植物群落碳、氮含量与土壤有机碳、氮含量之间的关系

将 32 个植物群落平均碳、氮含量与对应土壤中的有机碳、氮含量做线性回归相关分析, 结果表明: 植物群落碳含量与土壤有机碳、氮含量相关性不显著或不相关。

尽管植物营养元素大部分来源于土壤, 但不同元素在土壤的含量受元素本身的地球化学性质及土壤物理化学性质的影响, 导致不同元素在土壤和植

物间的变化不一样。其原因可能有三点：第一，由于此次研究跨越的空间尺度较大，植物群落生长的地貌变化相对较大，土壤、植物所处小环境中水、热、养分等因素不一致，因而碳、氮元素对于各个群落生长的影响不相同，所以可能导致在植物、土壤之间元素的转换存在差异，使得植物元素含量和土壤相应性质没有呈现出显著的相关关系。第二，群落中植物的种类、生产状况、体内的微环境及本身对环境的适应机制等各方面的不同，将导致植物对元素需求的差异，也可能使植物碳含量与土壤碳、氮含量没有明显的相关关系。第三，植物碳元素的来源主要是通过光合作用吸收大气 CO_2 最终合成植物体生命活动所需的各种含碳水化合物，因此研究区域大气参数（如 CO_2 浓度和光照）对于植物体合成含碳有机物影响要比土壤中碳、氮营养元素所产生的影响更为重要，其结果掩盖了土壤碳、氮元素对植物群落的地球化学行为。

总之，植物-土壤是一个复杂的开放的生态系统，植被对营养元素的吸收受控于土壤元素性质及土壤生物、化学、物理等多因子的影响，这也说明植物对元素的吸收积累不是由某一单个因子所能决定的，而是由多因子共同作用的结果^[22]。所以在某个特定区域内，土壤碳、氮元素含量的高低并不一定能提高相应群落碳含量水平。

由表 1 可看出，统计分析表明，植物群落氮含量与土壤氮含量也呈线性负相关关系，相关性同样达极显著水平 ($r = -0.464, P < 0.01, n = 32$)；植物群落氮含量与土壤有机碳含量呈线性负相关关系，相关性达极显著水平 ($r = -0.512, P < 0.01, n = 32$)。

氮是植物体生长发育所必需的营养元素，除豆科固氮植物以外，一般的植物必须从土壤中吸收无机氮素（主要以 NO_3^- 、 NH_4^+ 形式存在），用于满足自身的生命活动。研究中发现植物群落和土壤氮含量之间呈现出负相关关系，原因可能有以下两个方面：其一，本研究所提到的氮含量是指土壤的总氮含量，并非硝态氮和铵态氮的含量，故不能将其直接作为土壤氮的有效性指标^[23]。因为有机氮在矿化与硝化成 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 时，可能会被土壤微生物或土壤动物吸收利用并同化为自身组织，而使部分氮被固持起来，因此植物所能利用的氮是总矿化氮减去土壤微生物和动物固持的氮量后剩余的净矿化氮量^[24]。而总氮含量只能反映局部的腐殖质含量，高含量的腐

殖质常常与土壤氮的有效性呈负相关关系^[25]。其二，水分对于植物养分内部循环和养分利用效率有着极其重要的影响。Kost *et al.*^[26] 的研究表明，土壤水分条件越好，植物水分利用效率就越低，而氮素的利用效率就越高。北方干旱、半干旱地区，土壤水分含量匮乏，将直接导致植物对氮素的利用效率偏低。因此高氮含量的土壤在水分缺乏的条件下，由于其本身较低的氮素利用效率，往往导致植物氮含量反而偏低。基于以上两点，不难理解植物群落氮含量与土壤氮含量呈现显著的负相关关系。

在一定的程度上，比如土壤的 C/N 比值达到平衡状态时，土壤氮素含量大体上决定了有机质的含量，土壤碳的保持在很大程度上决定于土壤氮素水平^[27]。同理，土壤有机质的积累与分解直接影响着氮素在土壤中的存贮和转化，对土壤氮素含量起着主导作用^[28]。从表 1 可以看出，土壤有机碳和全氮之间存在极显著的正相关关系，线性回归结果为： $\text{TN} = 0.10 \text{ SOC} - 0.09$ ($r = 0.905, P < 0.01, n = 32$)（TN 表示土壤全氮含量，SOC 表示土壤有机碳含量），说明我国自然植被下表层土壤中氮素的含量与有机碳含量密切相关。一般而言，全氮含量高的，土壤有机碳含量亦高，两者表现出相对一致的变化规律。因此，当植物氮含量与土壤氮含量呈显著负相关关系时，我们也不难理解植物群落氮含量与土壤有机碳之间的负相关关系。

2.4 植物群落 C/N 与土壤 C/N 的变化特征

结合图 1 和图 5 分析，研究区域植物群落的 C/

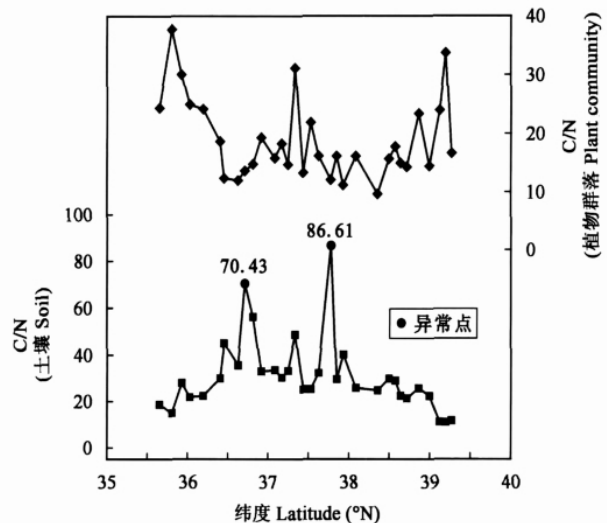


图 5 沿采样路线土壤和植被 C/N 比值空间变化对比特征

Fig. 5 Comparison of C/N ratio between the surface soil and the vegetation along the transect

N 比值变化范围在 9.612 ~ 37.735 之间, 平均值为 18.840。植物群落的 C/N 比值变化范围较大, 但所有的植物群落 C/N 比值都属于正常水平, 群落之间出现这么大差异主要可能是群落物种组成有差异所致。以本氏针茅、糙隐子草群落的 C/N 比值最高 (37.735), 大量分布于宁夏固原市附近 (35.9°N), 群落 C/N 比值最低点出现在内蒙古鄂托克前旗与宁夏盐池县交汇处 (38.4°N), 仅为 9.612, 主要以猪毛菜、星状角果藜群落为主。其中 87.5% 的植物群落 C/N 比值小于 25, 仅有少数群落 (12.5%) 的 C/N 比值大于 25。从整个采样带植物群落的 C/N 比值分布来看, 沿着甘肃平凉市到内蒙古鄂托克旗一带大致呈现出“W”型分布, 即在低纬度带和高纬度带偏高, 中间纬度带偏低。

分析图 5 中土壤 C/N 比值随纬度的变化, 我们发现 9 号和 19 号样地是两个异常点 (一般认为土壤 C/N 比值大于 2 且小于 70, 而这两个点分别为 70.43 和 86.61, 见图 5 中两个圆点)。出现这样的原因可能是由于两样地所处的地理位置造成的: 9 号样地位于谷底, 排水不良, 日积月累, 土壤含盐量偏高, 逐渐形成盐碱土; 而 19 号样地已经是轻度盐碱化的土地。由此一来, 两样地 pH 值较高, 氮元素都很容易以气态的形式释放到大气中, 其结果将导致土壤氮元素含量异常偏低, C/N 比值偏离正常范围。

在扣除这两个异常点后, 土壤 C/N 比值变化范围在 11.1 ~ 56.2 之间, 变化幅度较宽, 平均值为 28.0。Bohn *et al.* 的研究指出在几乎没有发生土地退化的草地中, C/N 平均比值一般在 12 左右^[29]。而此采样带土壤 C/N 比值已经接近其 2.5 倍, 说明土壤有机质腐殖化程度低, 有机氮不易矿化, 土地已经发生了严重的退化。对比朱志梅等在多伦草原的研究结果^[30], 此次研究区域 50% 左右的土地已经发生了重度以上的沙漠化, 仅有 9% 左右的土地尚处于潜在沙漠化阶段。以猪毛菜、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 群落下土壤 C/N 比值最高 (56.239), 其主要分布于海原县境内 (36.8°N), 蒺藜 (*Tribulus terrestris*)、糙隐子草群落下土壤 C/N 比值最低 (10.996), 此群落广泛分布于内蒙古鄂托克旗附近 (39.2°N)。

在土壤-植被系统中, 土壤为植物生长提供水分和营养元素, 而植被对土壤产生生态效应, 其中植被对土壤养分的生态效应引起了一些研究者的关注^[31]。一般情况下, 如果植物群落空间变异与土壤

C/N 比值变化有关的话, 那么, 当土壤中有高 C/N 比值植物生长的话, 此时对应区域的土壤 C/N 比值也似乎应随之升高。然而研究结果却表明: 随着纬度的增加, 群落 C/N 比值与对应土壤 C/N 比值表现出不一致的变化规律 (图 5)。相反, 从图中还可以看出高 C/N 比值的植物输入反而使得某些地方土壤的 C/N 比值降低。相关性分析表明, 植物群落 C/N 与土壤 C/N 比值之间呈现统计学上的显著负相关关系, 相关系数为: $r = -0.392$ ($P < 0.05$, $n = 32$) (表 1)。说明沿该纬度带土壤碳、氮元素组成出现的异乎寻常现象主要不是由于植被的输入所引起的, 这可能主要与以下几个方面有关。

第一, 结合生物量和降雨量资料分析 (图 2 和图 4) 不难发现, 北方干旱少雨的天气导致植被稀疏, 地表常处于半裸露状态, 盖度低, 年生物量较少 (40.6% 的植物群落生物量小于 90 g/m^2 , 34.4% 的生物量在 $100 \sim 140 \text{ g/m}^2$ 之间, 18.7% 的生物量在 $150 \sim 290 \text{ g/m}^2$ 之间, 仅有 6.3% 的生物量大于 450 g/m^2 , 整个群落生物量平均值仅为 121.4 g/m^2)。这样一来, 枯枝落叶就显得十分稀少, 结果使得其分解对土壤养分的补充相对不足, 最终导致植物群落对土壤养分 (特别是 C/N 比值) 的贡献差异不明显。

第二, 植被生物量只有经过一定的主要由微生物参与的分解过程才能转化为土壤有机质, 因此土壤中微生物的数量和活性在某种程度上决定了这一转化过程^[32]。然而在干旱少雨的北方地区由于植被根系分泌物较少, 周围不能为土壤微生物提供适宜的栖息场所, 导致微生物数量少, 活性弱。即使有微生物的存在, 由于地表的生态环境变化比较剧烈, 温度较高, 蒸发量大, 枯枝落叶的持水量减少, 也不利于地面微生物的分解作用, 因而枯枝落叶的分解相当缓慢^[33], 往往导致该纬度带的植被枯枝落叶还没及时有效地转化为营养元素补给土壤, 就已被雨水冲刷掉或被人为移走, 因此, 植物群落的输入也很难使其土壤碳、氮含量有明显的变化。

第三, 我们知道植物的分解不仅与土壤微生物的数量、种类有关, 同时也与枯枝落叶的化学组成以及环境中的非生物因素如温度、水分、土壤通气状况等有关^[34]。微生物在以植物残体作为营养时, 每同化 4 ~ 5 份碳, 就需要 1 份氮, 同时还需要 20 份碳作为能源 (C/N 比值约为 25 : 1)。当 $C/N < 25 : 1$ 的有机物分解时, 由于氮素养料相对比较充足, 在微生物数量一定的条件下, 有机质分解就比较快^[35]。因此在一定的水分和微生物条件下, 由于此样带群落

植物的 C/N 比值绝大多数 (87.5%) 小于 25:1, 非常适合微生物的活动, 植物残体分解相当迅速, 最终导致植被残体在土壤中的停留时间十分有限。在七八月份降雨比较多的季节里, 很容易随雨水淋溶流失, 结果群落对土壤营养元素的保护力度不够, 因此低 C/N 比值的植物群落在短时间内很容易转化为可溶性的养分随降雨流失, 且由于流失速率的不一致, 往往氮元素的流失速率过快, 结果很容易导致表层土壤 C/N 比值的升高。

另外, 值得注意的是植物在分解过程中还常伴随着碳、氮元素的损失, 碳、氮的平均损失分别为 24% 和 15%^[36], 因此在黄土高原北部 - 宁夏中东部地区, 即使土壤中生长期高 C/N 比值的植物群落, 由于微生物的数量与活性, 土壤中碳、氮营养元素流失速率的差异以及植被枯枝落叶分解过程中碳、氮损失程度的不一致 (C 在分解过程中相对于 N 来说损失更多) 等因素的影响, 结果往往导致土壤 C/N 比值变化不明显, 甚至还会出现土壤 C/N 比值反而降低的现象。所以我们在推测一个地方土壤碳、氮元素变化的原因时, 除要考虑植被类型外, 还应考虑土壤所处的地理区域、土壤所在的地形部位和土壤质地等因素的影响。

3 结 论

各地区植物群落生物量与降雨量呈现出显著正相关关系, 说明该研究区域降水量是控制植物群落生物量空间变化最为关键的气候因子。一般情况下, 随着温度的增加和降雨的减少, 植被生物量会明显降低。

研究区域内 71.9% 的植物群落平均碳含量在 40% ~ 45% 之间, 属于正常范围。碳含量以苦豆子、达乌里胡枝子群落最高 (44.225%) , 蛛丝蓬、骆驼蓬群落最低 (35.516%) 。84.4% 的植物群落平均氮含量在 2% ~ 4% 之间, 仅有 3.1% 的群落氮含量大于 4% 。平均氮含量以猪毛菜、星状角果藜植物群落最高 (4.482%) , 蛛丝蓬群落最低 (仅为 1.356%) 。

植物群落碳含量与土壤碳、氮含量相关性不显著或无相关, 而植物群落氮含量与土壤有机碳、氮含量均呈线性负相关关系, 相关系数分别为: $r = -0.512$ 、 $r = -0.464$ ($P = 0.01$, $n = 32$), 相关性均达极显著水平, 这可能主要与参与合成植物体有机物质碳、氮元素的来源以及元素本身地球化学性质等因素有关。

北方荒漠化初期阶段的草地, 土壤 C/N 比值与对应植物群落 C/N 比值呈现出不一致的变化规律, 说明植物群落的空间变化不是引起土壤 C/N 比值异常升高的主要原因, 这可能主要与微生物活动以及植物残体分解的难易程度等因素有关。从而使我们认识到植被对土壤碳、氮元素 (特别是 C/N 比值) 的影响不是简单的一味地增加的关系, 高 C/N 比值的植物群落输入不一定就能引起对应区域土壤 C/N 比值的增加, 所以今后在分析土壤地球化学参数变化时, 除了考虑植被类型外, 还应综合考虑土壤所处的地理区域、土壤所在的地形部位和土壤质地等因素的影响。特别需要指出的是, 土壤微生物的研究对于全面认识植被与土壤之间的养分循环是必不可少的, 而土壤微生物参与的分解和转化过程是非常复杂和极其不确定的, 因此有关微生物在这方面的研究还有待进一步加强。

参考文献 (References) :

- [1] MacKinnon J, 解焱. 利用天然植被改善中国退化环境 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 50p.
MacKinnon J, Xie Yan. Improving Chinese Degenerate Environment by Natural Vegetation [M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2001: 50p (in Chinese).
- [2] 李鑫. 黄土高原北部风沙区土地沙漠化问题及防治对策 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 133 - 137, 145.
Li Xin. Land desertification of the northern Loess Plateau in China [J]. Chinese J Geol Control, 2006, 17(1): 133 - 137, 145 (in Chinese with English abstract).
- [3] O'Connor T G, Haines L M, Snyman H A. Influence of precipitation and species composition on phytomass of a semi-arid Africa grassland [J]. J Ecol, 2001, 89(5): 850 - 860.
- [4] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究 [J]. 生态学报, 1999, 19(5): 607 - 613.
Ouyang Zhi-yun, Wang Xiao-ke, Miao-Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values [J]. Acta Ecol Sinica, 1999, 19(5): 607 - 613 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王卫红, 赵劲松. 生态系统服务功能的保护与可持续发展 [J]. 科技情报开发与经济, 2001, 11(2): 73 - 74, 76.
Wang Wei-hong, Zhao Jin-song. On protection of service functions of ecosystem and sustainable development [J]. Sci Tech Inf Develop Econ, 2001, 11(2): 73 - 74, 76 (in Chinese with English abstract).
- [6] 蒋志刚. 野生动物的价值与生态服务功能 [J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1909 - 1917.
Jiang Zhi-gang. Values and ecological service function of wildlife [J]. Acta Ecol Sinica, 2001, 21(11): 1909 - 1917 (in Chinese with English abstract).

- [7] 凌青根. 生态系统健康与服务功能[J]. 华南热带农业大学学报, 2001, 7(4): 67-70, 74.
Ling Qing-gen. The function of health and service in ecosystem [J]. J South China Univ Trop Agr, 2001, 7(4): 67-70, 74 (in Chinese).
- [8] Robertson G P, Vitousek P M. Nitrification potentials in primary and secondary succession [J]. Ecology, 1981, 62(2): 376-386.
- [9] Vitousek P M, Matson P A, Cleve K V. Nitrogen availability and nitrification during succession: Primary, secondary, and old-field seres [J]. Plant Soil, 1989, 115(2): 229-239.
- [10] 安韶山, 黄懿梅, 李壁成, 杨建国. 黄土丘陵区植被恢复中土壤团聚体演变及其与土壤性质的关系[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 45-50.
An Shao-shan, Huang Yi-mei, Li Bi-cheng, Yang Jian-guo. Characteristics of soil water stable aggregates and relationship with soil properties during vegetation rehabilitation in a Loess hilly region [J]. Chinese J Soil Sci, 2006, 37(1): 45-50 (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘守赞, 郭胜利, 王小利, 薛宝民. 植被对黄土高原沟壑区坡地土壤有机碳的影响[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 529-536.
Liu Shou-zan, Guo Sheng-li, Wang Xiao-li, Xue Bao-min. Effect of vegetation on soil organic carbon of slope land in gully region of Loess Plateau [J]. J Nat Res, 2005, 20(4): 529-536 (in Chinese with English abstract).
- [12] 苏静, 赵世伟. 植被恢复对土壤团聚体分布及其有机碳、全氮含量的影响[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 44-46.
Su Jing, Zhao Shi-wei. Influence of vegetation restoration on distribution of aggregate and organic carbon and nitrogen in Loess Plateau [J]. Res Soil Water Conserv, 2005, 12(3): 44-46 (in Chinese with English abstract).
- [13] Olson J S, 阳含熙. 碳素循环与温带森林、植物生态学译丛[M]. 北京: 科学出版社, 1974: 96-107.
Olson J S, Yang Han-xi. Translations of Carbon Cycle, Temperate Forest and Plant Bionomics [M]. Beijing: Science Press, 1974: 96-107 (in Chinese).
- [14] 侯学煜. 中国植被地理及优势植物化学成分[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 260-370.
Hou Xue-yu. Chinese Vegetation Geography and the Chemical Component of Dominant Plants [M]. Beijing: Science Press, 1982: 260-370 (in Chinese).
- [15] Jobbagy E G, Sala O E. Controls of grass and shrub aboveground production in the Patagonian Steppe [J]. Ecol Appl, 2000, 10(2): 541-549.
- [16] Lauenroth W K, Sala O E. Long-term forage production of North American Shortgrass Steppe [J]. Ecol Appl, 1992, 2(4): 397-403.
- [17] Sala O E, Parton W J, Joyce L A, Lauenroth W K. Primary production of the Central Grassland region of the United States [J]. Ecology, 1988, 69(1): 40-45.
- [18] Jobbagy E G, Sala O E, Paruelo J M. Patterns and controls of primary production in the Patagonian Steppe: A remote sensing approach [J]. Ecology, 2002, 83(2): 307-319.
- [19] Noy-Meir I. Desert ecosystems: Environment and producers [J]. Ann Rev Ecol System, 1973, 4(1): 25-51.
- [20] Chapin F S III, Matson P A, Mooney H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology [M]. New York: Springer-Verlag, 2002: 129-132.
- [21] 谭雅枝. 甘肃土地荒漠化与人类活动[J]. 甘肃林业科技, 2002, 27(1): 22-25, 56.
Tan Ya-zhi. Land desertification and human activities in Gansu [J]. J Gansu Forest Sci Technol, 2002, 27(1): 22-25, 56 (in Chinese with English abstract).
- [22] 谢丽萍. 石漠化过程中土壤-植被系统营养元素的协变关系——以贵州花江峡谷查耳岩小流域为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2006.
Xie Li-ping. The nutrient elements' co-variances of soil-vegetation system in the process of rocky desertification—A case study of the chaeryan small catchment of Huajiang gorge area, Guizhou [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [23] Yuan Zhi-you, Li Ling-hao, Han Xing-guo, Huang Jian-hui, Jiang Gao-ming, Wan Shi-qiang. Soil characteristics and nitrogen resorption in *Stipa krylovii* native to northern China [J]. Plant Soil, 2005, 273(1/2): 257-268.
- [24] 苏波, 韩兴国, 渠春梅, 黄建辉. 东灵山油松纯林和油松-辽东栎阔混交林土壤氮素矿化/硝化作用研究[J]. 植物生态学报, 2001, 25(2): 195-203.
Su Bo, Han Xing-guo, Qu Chun-mei, Huang Jian-hui. Net nitrogen mineralization and nitrification in one pure pine (*Pinus Tabulaeformis*) forest and one pine-oak mixed forest in Dongling mountainous region [J]. Acta Phytoecol Sinica, 2001, 25(2): 195-203 (in Chinese with English abstract).
- [25] Jenkinson D S, Hart P B S, Rayner J H, Parry L C. Modeling the turnover of organic matter in long-term experiments at Rothamsted [J]. Intecol Bulletin, 1987, 15: 1-8.
- [26] Kost J A, Boerner R E J. Foliar nutrient dynamics and nutrient use efficiency in *Cornus florida* [J]. Oecologia, 1985, 66(4): 602-606.
- [27] 刘景双, 杨继松, 于君宝, 王金达. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 5-8.
Liu Jing-shuang, Yang Ji-song, Yu Jun-bao, Wang Jin-da. Study on vertical distribution of soil organic carbon in wetlands Sanjiang Plain [J]. J Soil Water Conserv, 2003, 17(3): 5-8 (in Chinese with English abstract).
- [28] Wang Jun, Fu Bojie, Qiu Yang, Chen Liding. Soil nutrient in relation to land use and landscape position in the semi arid small catchment on the Loess Plateau in China [J]. J Arid Environ, 2001, 48(4): 537-550.
- [29] Bohn H L, McNeal B L, O'Connor G A. Soil Chemistry [M]. 2nd ed. New York: John Wiley, 1985: 148-321.
- [30] 朱志梅, 杨持, 曹明明, 刘颖如, 刘美玲. 多伦草原土壤理化性质在沙漠化过程中的变化[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1): 1-5.
Zhu Zhi-mei, Yang Chi, Cao Ming-ming, Liu Ying-ru, Liu

- Mei-ling. Changes of soil physical and chemical properties in sandy desertification on the Duolun prairie [J]. Bull Soil Water Conserv, 2007, 27(1): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- [31] 王百群, 吴金水, 赵世伟. 子午岭林区植被类型对土壤氮素的效应[J]. 水土保持通报, 2002, 22(6): 23-25.
- Wang Bai-qun, Wu Jin-shui, Zhao Shi-wei. Impacts of vegetation types on soil nitrogen in Zi-wuling forest region [J]. Bull Soil Water Conserv, 2002, 22(6): 23-25 (in Chinese with English abstract).
- [32] Pastor J, Aber J D, McClaugherty C A, Melillo J M. Aboveground production and N and P cycling along a nitrogen mineralization gradient on Blackhawk Island Wisconsin [J]. Ecology, 1984, 65(1): 256-268.
- [33] 王妮, 郭继勋. 东北松嫩平原羊草群落的土壤呼吸与枯枝落叶分解释放 CO₂ 贡献量 [J]. 生态学报, 2002, 22(5): 655-660.
- Wang Wei, Guo Ji-xun. Contribution of CO₂ emission from soil respiration and from litter decomposition in *Lymus chinensis* community in northeast Songnen grassland [J]. Acta Ecol Sinica, 2002, 22(5): 655-660 (in Chinese with English abstract).
- [34] 王启兰, 姜文波. 青藏高原金露梅灌丛与矮嵩草草甸枯枝落叶的分解作用[J]. 草地学报, 2001, 9(2): 128-132.
- Wang Qi-lan, Jiang Wen-bo. Litter decomposition of *Potentilla fruticosa* shrub and *Kobresia humilis* meadow in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Agrest Sinica, 2001, 9(2): 128-132 (in Chinese with English abstract).
- [35] 郭继勋, 祝廷成. 羊草草原枯枝落叶分解的研究——主要优势植物的分解速率和损失率[J]. 生态学报, 1992, 12(4): 295-301.
- Guo Ji-xun, Zhu Ting-cheng. Study on litter decomposition in *Lymus chinensis* grassland—Decomposition rate and lost rate of dominant plants [J]. Acta Ecol Sinica, 1992, 12(4): 295-301 (in Chinese with English abstract).
- [36] Murty D, Kirschbaum M U F, Mcmurtrie R E, Mcgilvray H. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature [J]. Global Chang Biol, 2002, 8(2): 105-123.