

土壤水研究进展与方向评述

肖德安^{1,2}, 王世杰^{1*}

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 100039

摘要: 土壤水与大气水、地表水、地下水和植被有着紧密的联系, 是水资源中最重要和最复杂的部分。为了给农业生产、生态恢复、环境治理以及水资源合理利用提供有效的理论指导, 国内外已经有了较多关于土壤水的研究成果。在综述土壤水研究的进展和已有成果基础上, 重点分析了当前在土壤水研究方向上所存在的问题。以往的土壤水研究较多集中于其物理性质, 如水分含量及利用、土壤水盐分及其运移规律、土壤水动力学及数学模拟模型研究、土壤水水量计算及水平衡研究等, 而对其化学性质的研究和认识较为不足, 特别是其地球化学特征的研究更是较少。然而土壤水的地球化学特征同样是决定着土壤水的运移规律的重要因素, 但目前此方向的研究只有土壤水同位素地球化学研究。由于土壤水取样困难, 土壤水元素地球化学和与环境污染有关的土壤水地球化学研究也仍然较少。因此, 今后应当加强对土壤水地球化学特征的研究, 并逐步提高实验技术和积累研究经验, 以期能更全面地揭示土壤水的本质特征及其运移规律。

关键词: 土壤水; 物理性质; 地球化学; 进展; 研究方向

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 03-1182-07

土壤水是指地表面以下至地下水水面(潜水面)以上土壤层中的水分, 也称为非饱和带土壤水^[1]。在水文循环中非饱和带土壤水的运移被认为是最重要和最复杂的部分^[2]。土壤水是水资源的重要组成部分, 不但储水量大, 而且与生态环境和人们生活密切相关^[3]。土壤水是联系地表水、地下水和生物地球循环的纽带, 是物质传输和运移的载体, 在四水转换和物质循环中扮演着重要的角色。土壤水是农业和自然植被所需水资源的主要来源^[4], 维持着全球初级生产力形成的能量平衡和物质传输^[5], 这都充分展示了土壤水在水资源中的重要性, 也体现出开展土壤水研究的必要性。

土壤水研究是水科学研究中的重要研究内容, 过去的研究主要集中在土壤水分含量及水分利用^[6-10]、土壤水盐分及其运移规律^[11-14]、土壤水动力学及数值模拟模型研究^[15-19]、土壤水水量计算及水平衡研究^[20-23]、土壤水评价^[24-28]等方面, 从物理学角度进行了土壤水物理学特征的研究, 较少采用地球化学方法从微观上研究土壤水的性质、成因及其运移规律, 使土壤水地球化学研究成为土壤水研究中的弱项, 仅有少量研究用稳定同位素(碳、氢、氧)地球化学方法研究土壤水分的利用和运移^[29-33]。现今, 地球化学的基本原理、研究方法和技术已被广泛应用于环境调查和生态研究中, 在地表水和地下水研究中更为突出, 从地球化学的角度对水中的化学成分、同位素组成、元素的

分布和迁移等地球化学特征进行研究, 揭示出地表水和地下水的内在特征和运移规律, 进一步提出了许多解决地表水、地下水环境污染及评价水资源等问题的方法和对策。由于受土壤水取样量和测试手段的制约, 土壤水地球化学研究方面的工作进展缓慢, 未能较全面地对土壤水中化学组分(离子组成、营养元素等)进行测试与分析, 只局限于土壤水分、土壤水含量、土壤含盐量、pH、电导率、渗透势等指标的分析^[25]。对于土壤水的研究, 缺乏地球化学特征的研究资料, 很难从本质上揭示土壤水的性质及运移规律。因此, 加强土壤水的地球化学特征研究, 对掌握土壤水运移机理、地下水污染过程、水循环原理以及正确评价水资源有重要的意义, 在生态环境功能优化中起着重要的指导作用。

鉴于此, 作者就土壤水的研究现状、土壤水地球化学研究最新进展、研究的途径和方法、存在的问题及今后的研究重点等进行了系统的分析和综述。

1 土壤水物理特性的研究现状

1.1 土壤水分含量及其应用研究

在土壤水分基础理论及其应用方面, 已有较多研究作了较为详细的总结和综述^[1, 34-35]。土壤水分在不同尺度范围下对自然生态环境的响应起关键的作用。在全球尺度下, 土壤水分与地球的气候系统相互作用, 通过蒸发控制着大气圈的水文学循环和气候变化^[36]。就此以土壤水作为切入点对气候变

基金项目: 中国科学院知识创新重要方向基金项目资助(KZCX2-YW-306); 国家自然科学基金项目资助(40672112)

作者简介: 肖德安(1981年生), 男, 博士, 研究方向为主要从事土壤水、地下水环境地球化学研究。E-mail: xiaodean@hotmail.com

*通讯作者: E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

收稿日期: 2009-03-16

化进行研究已成为当前土壤水研究的热点之一^[37]。在中尺度下,土壤中已经存在的土壤水将影响降水的渗透进而形成径流,这样就会造成土壤侵蚀和洪灾^[38],其影响程度取决于下垫面的土壤水状况。这些问题让土壤水分在水文研究中显得非常重要,它不仅支配降水如何被分配为径流和下渗,还决定入射辐射如何分配给显热和潜热,其时空分布可用来判断流域的水文活动区^[39]。在较小的尺度下,当地的土壤水渗透模式和土壤中的优先流可促进杀虫剂、重金属等溶解物的下渗,导致与土壤水有关的生态环境问题不断出现,造成土壤与地下水的污染等问题^[40],这些问题无一不与土壤水发生联系。为了解决土壤污染和地下水污染,需进一步研究土壤水分的影响,使得土壤水分研究成为了当前土壤水研究的又一热点。

农业是用水大户,水资源的短缺已成为制约农业和国民经济发展的瓶颈,尤其在干旱、半干旱地区更为突出。如何解决农业用水问题,是解决水资源短缺的关键。土壤水是可被作物直接利用的唯一水资源,是农业水资源系统的核心。据已有研究资料表明,平原地区降水的70%以上转换为土壤水^[25]。基于此,国内外学者已广泛开展土壤水分利用的研究。这些研究主要集中解决土壤水分含量的问题,其所采用的研究方法和手段各异,如Gaskin等^[7]采用简化阻抗测定技术、Gardner等^[8]用高频电容传感器、Seyfried等^[9]用50-MHz土壤电介质传感器、Ishizuka等^[10]用时段反射仪(TDR)分别对土壤水分进行测定和研究。由于受经济结构和水资源短缺问题的限制,我国学者更是集中精力围绕着农业土壤水分的转化问题与水分的有效利用开展了大量的研究,解决农业节水问题。总之,合理利用土壤水分仍然是农业发展中的关键,致使土壤水分应用研究成为土壤水研究中永恒的主题。

土壤水分异质性的研究是当今水文学和土壤学研究中的热点之一。关于土壤水的异质性问题,70年代就受到国际学术界普遍重视^[34],从此开始了土壤特性空间变异性的研究。对其研究现状与进展状况,王军^[41]、肖洪浪^[42]等分别从不同的角度进行了详细的综述,兹不赘述。

1.2 土壤水盐分及其运移规律研究

植物生长所需的盐分主要通过土壤水输送,植物吸收水分的同时必定伴随着盐分的迁移,这样土壤水和盐分耦合成为土壤水盐分。土壤水盐分是影响植物生长的重要因素,对其进行研究,在农业生产和生态恢复中将起积极的指导作用。对其迁移特征进行分析研究是认识土壤水动态变化过程和规律的有效方法。关于这方面的研究已有较多研究和

成果。例如,Heuer和Nadler^[43]进行了马铃薯对土壤水和盐分缺乏的生理反应的研究,认为在盐分的胁迫下马铃薯的生长受到制约;Wu等^[11]建立状态空间模型估算浅层地下水对植物的根部水分含量和盐分的影响,然后根据盐分条件提供一个弹性的实时的灌溉时间表,从而使得满足灌溉需求的同时使用水量最小;Shani和Dudley研究认为缩小灌溉水量的供应和满足其它越来越多的用水需求的方法就是强制农民使用盐水灌溉^[44];Munns则指出需要选择一个适当的灌溉系统为植物的根际提供充分的水量以满足蒸发需求并使根际的盐分积累最小^[45]等。这一系列研究综合了植物生长过程中土壤水分运移和盐分迁移的耦合机理,促进了生态农业的发展,为干旱、半干旱地区合理的农业灌溉提供一个适宜的水量和盐分含量参考。

目前,国内外关于土壤水盐分运移的研究,主要是针对干旱、半干旱地区的土壤盐渍化问题。土壤盐渍化是干旱、半干旱地区普遍存在的世界性严重问题,也是影响农业持续发展的战略问题。Zhang等^[12]对土壤水盐分的测定方法进行了改进研究;Wittler等^[13]对美国阿肯色州的一个河谷进行土壤水盐分的研究,并建立区域尺度的土壤盐分评价校正模型;Ahmed等^[14]研究沙丘地区的土壤水盐分,并对灌溉进行有效的管理。这些关于土壤水盐分迁移规律的研究,是预测和防治土壤盐渍化的重要理论依据,也是农田灌溉、环境水利、水文地质、土壤物理、溶质动力学领域中关注的研究热点。进行盐分迁移规律研究,能有效地解决土壤水盐分在非饱和带的运移问题。

1.3 土壤水动力学及数值模拟研究

由于受地形、土壤、植被、气候等条件的影响,土壤水运移特征复杂,传统的形态学观点已不能很好地解决生产实践中不断出现的土壤水运移问题,于是开始土壤水的能量状态及动力学研究。

Buckingham^[46]自从1907年首次提出土壤水势的概念,开辟了利用能量观点进行土壤水运动研究的新途径;到1931年,Richards^[47]提出毛管理论并导出非饱和流方程,使人们进一步深化了对土壤水性质及其运动机理的认识;1952年Klute^[48]建立了扩散方程,并把毛管势变成了土壤含水量,扩展了土壤含水量在土壤水分运动研究中的作用;Philip等人^[49]于1957年提出了水分运动的热扩散方程式,揭示了土壤水运动的水热耦合特征,为后来的SPAC理论的提出奠定了基础。SPAC(Soil-Plant-Atmosphere Continuum)理论是Philip于1966年提出的,认为土壤水分运动循环过程是土壤-植物-大气的连续体,水分由土壤进入植物体,再

由植物体向大气扩散,其驱动力为水势梯度^[50]。从此,数学物理方法被逐步引入到土壤水的研究,使该领域的研究有了长足的进步,逐步由静止走向动态、定性描述走向定量、经验走向机理。用数学物理方法定量研究水分运动取得了一系列进展,并形成相对独立的学科——土壤水动力学^[51]。

数值模拟是研究土壤水运动和表征土壤水动力学特征的重要手段。20世纪80年代以后,数值模拟被广泛应用到土壤水的研究中,计算机技术的发展也使方程的求解成为可能。国外许多学者已从不同的角度进行土壤水动力学及数值模拟研究工作,Sala等在一个短禾草的草原进行了长达33 a的土壤水动力学研究,并建立了相应的模拟模型^[15];Tiktak和Bouten为模拟非饱和带土壤水的流动规律,建立森林生态系统土壤水动力学模型^[16],这个模型给土壤水的流动方程一个半隐式有限差分的解;Kennedy和Price在一个砍光树木的泥炭系统开展土壤水动力学模拟^[17],进而认识该系统的水文学特征并为植被的恢复改进水管理计划;Laczova和Stekauerova在一个山坡上进行了渗透实验,观察山坡土壤水文学响应,认为山坡土壤水动力学的数学模型是非常有效的和相对精确的水文学模拟方法^[18]。与此同时,SPAC理论被引入国内,并开展土壤水分运动动力学、数值模拟及水分运动参数的测定等方面的研究工作,取得一定进展。其代表性成果有:杨邦杰开展了土壤蒸发过程的数值模拟及其应用研究^[52];康绍忠等对SPAC水分传输动态计算机模拟模型研究^[53];王靖等对SPAC理论的研究现状和进展作了详细的阐述^[54],兹不详列。

1.4 土壤水水量计算及水资源评价研究

20世纪70年代,前苏联学者李沃维奇(M Nputotulu)提出了土壤水资源概念,此后,前苏联学者Budagovskii和Busarova发表了关于土壤水资源的论述^[55];经过30 a来对土壤水资源的深入研究,研究人员逐步认识到土壤水的资源属性;而现在土壤水资源作为一种重要的自然资源已得广泛认同。但是,土壤水资源在空间上受地形地貌、土壤、植被等影响而具有不连续性;在时间上受气候、降雨等影响而具有季节变化性;这样,土壤水资源分布的时空变异性导致了土壤水问题的复杂化。基于土壤水的特殊性和复杂性,对土壤水资源概念的定义还未统一,还存在不同的见解。对土壤水进行水量计算和评价还存在许多不确定性,致使土壤水水量计算和资源评价的内容和方法至今尚未形成统一的共识。

土壤水是一种储量、可就地利用的资源,在农业生产中对其加以合理的开发利用具有重要的

经济和环境保护意义。所以,要合理开发利用土壤水资源,就必须加强对土壤水资源理论、资源量计算及资源评价等进行研究。

作为水资源的土壤水,如何对其资源量进行计算和评价?计算和评价土壤水资源的基本原理是水平衡原理。其要点是确定土壤水平衡参数,包括降雨入渗系数、土壤蒸发系数、植被吸收系数、土壤水补给地下水系数及地表水、地下水补给土壤水系数等。近些年来,国内外学者对土壤水资源的研究积累了大量的资料,出现了许多观点。Oren等进行了土壤水平衡和变化计算,采用不同的方法探讨了植被蒸发的问题^[20];Wilson等在美国东南部的一个由不同年龄的植物组成的落叶森林内,采用多种方法对多年的土壤水分蒸发蒸腾损失总量、土壤水预算、树干液流等进行研究,认为土壤水水量与土壤水分蒸散、树干液流等相关^[21];Kendy等用土壤水平衡原理去量化地下水补给量^[22];Daly和Porporato研究了气象水文变化对土壤水平衡的影响^[23];Shiklomanov对全球的水资源评估,探讨了不同国家和地区的水资源短缺问题以及土壤水利用问题^[24];而国内学者也从不同角度对其开展了研究,靳孟贵等以河北王瞳试验区为例,探讨土壤水资源的评价内容与方法,提出用土壤水资源年补给量、作物生长期土壤水资源可利用量等指标进行土壤水资源量的评价^[25];夏自强等分析了土壤水资源的结构,提出了土壤水资源评价方法,重点研究了可更新的土壤水资源和可开发利用的土壤水资源^[26];周凌云等提出了土壤水资源的评价系数,以估计土壤水资源对植物供水的贡献^[27];王浩等对土壤水资源的内涵作了探讨,并建立了一套土壤水资源评价指标体系,以土壤水蓄水量、最大可能被利用的土壤水资源量、可能被作物直接吸收利用的土壤水资源量为指标对土壤水进行了计算和评价^[28]。造成这些评价内容、方法和指标的差异的原因是土壤水的概念不统一和对土壤水资源范围划分的不一致。

在水资源评价中另一重要应用是研究四水(大气水、地表水、土壤水与地下水)转化规律。四水转化问题的研究是水土资源平衡分析的科学基础和依据。在四水转化研究中,土壤水是核心,也是难点。只有做好土壤水资源的评价,才能准确评价水资源。

2 土壤水地球化学研究的最新进展

2.1 土壤水同位素地球化学研究

20世纪60年代以来,用同位素示踪的方法研究水流运动问题得到发展,并逐步形成了同位素水文学这一专门学科。同位素方法为研究地下水提供了

一种新的有效手段,它有助于从宏观上和微观上阐明水文过程的机理。目前,同位素方法在水文地质的各个领域得到了广泛应用,在土壤水分利用和运移过程的研究中也引入环境同位素方法,并取得了良好效应。对于土壤水研究中应用最多的是碳、氮、氢、氧等环境同位素,国内外的一些学者用重水(D_2O 、 T_2O)^[56]、氘(2H)、氚(3H)作为追踪剂对土壤水的入渗规律及真实速度进行了实验研究^[57],碳(^{13}C)、氮(^{15}N)同位素示踪营养元素在土壤水中的迁移特征及植被的有效利用情况,并取得很好效果。Gehrels等运用 ^{18}O 在草地、荒野和森林等植被条件下研究土壤水的运移机制,揭示了不同植被条件下土壤水迁移的季节变化特征^[29];Robertson等测定降雨和土壤水的氧同位素组成,证实了 ^{18}O 的值与季节性的水文学变化有关^[30];Yano等揭示了粘土层中 2H 值的异质性, 2H 值变化受降雨的影响,同时在粘土层的上下层之间发现 2H 值有一个显著的差异^[31];Lee等采用氢氧同位素分析土壤水在非饱和带的运移特征^[32];国内学者田立德等测定了青藏高原中部那曲地区降水和土壤水中稳定同位素,分析了不同层位土壤剖面中稳定同位素的变化规律及与水分迁移的关系;其研究结果发现,土壤表层水中 ^{18}O 受降水中 ^{18}O 的直接影响,并且与降水中 ^{18}O 有相同的变化趋势。不同土壤剖面水中 ^{18}O 的变化反映了降水向地下逐渐渗透的过程,表层土壤中 ^{18}O 受降水的影响最为明显,而向下土壤中 ^{18}O 受地下水 ^{18}O 的影响增强,显示出地下水在土壤水活动中起着活跃的作用^[33]。

总之,同位素方法在土壤水研究中的应用,丰富了土壤水的研究内容,为进一步揭示土壤水的特征及其运动规律提供了有效的手段。同位素技术的发展促进了水循环的机理和过程研究,广泛应用于辨识水汽来源、大气降水、地表水、土壤水和地下水之间转化规律,植物水分利用和土壤水运动等方面。关于土壤水的同位素地球化学研究还有待继续深入研究。

2.2 土壤水元素地球化学循环研究

在自然界中,大气水、地表水、土壤水和地下水都在不断运动和相互转化。土壤水与大气水、地表水、地下水以及土壤和植被有着重要的联系,在物质循环和水循环过程中发挥重要的作用。对作为四水循环核心环节的土壤水,开展土壤水元素地球化学循环的研究很有必要,具有重要的科学意义。

但是,由于受到土壤水的取样方法和测试手段的制约,土壤水元素地球化学循环研究方面的工作未能得到有效地开展。在当前元素地球化学循环研究中,土壤水元素地球化学循环研究将为这个领域

填补空白并作出重大贡献。

2.3 与环境污染有关的土壤水地球化学研究

近年来,环境污染、生态破坏、沙漠化、石漠化等生态环境问题日益突出,生态环境保护问题已得到国际国内高度重视。化肥、农药、重金属等对土壤与地下水的污染,都与土壤水有重要的联系。土壤水是污染物运移的载体,这些污染物质在土壤中运移状况与土壤水的流动有关,也与土壤水移动过程中所发生的物理、化学和生物化学过程有密切关系,如根的吸收、土壤表面的挥发、降解(农药的水解及微生物的降解)、硝化与反硝化、溶解与沉淀等等。所以,从土壤水的角度研究污染物迁移、转化将有一个广阔的前景,为解决土壤污染和地下水污染问题提供有效途径。这方面的研究需要解决的首要问题仍然是土壤水的取样问题,必须要具有一定的土壤水才能开展进一步的工作。

3 研究途径和方法

随着科学技术的发展和土壤水研究的不断进行,对土壤水研究的途径和方法也逐渐完善和多样化,相应的分析仪器也得到快速发展。关于土壤水物理特性研究的方法已相对成熟,Baker对各种方法作了很详细的描述^[6]。土壤水分研究最经典的方法是烘干称重法,该方法操作简单,其缺点是需要耗费时间、人力并对取样地点具有一定的破坏性;中子仪法是一种相对简单、精确、可靠的实时监测土壤水分的方法,但是为了防护放射性物质的影响需要很高的成本,同时也耗时耗力;热分散传感法是通过测定土壤温度的变化对热脉冲的响应进而测得土壤水张力而得出土壤水含量;目前最常用的新方法是时域反射仪(TDR)法,TDR使用方便、精度高、测定快速;其它还有很多方法,如张力计法、简化电阻块法、干湿计法、远红外遥感法、高频电容传感法、伽马射线衰减法、湿度计法、电磁技术等等。

20世纪90年代后,在土壤水分遥感监测理论方面的研究得到了深入,利用“3S”技术进行土壤水研究有了很大进展。目前,国内外已广泛使用遥感技术监测大尺度区域的土壤水分,汪潇等对其进行了详细的综述^[58]。遥感技术获取土壤水分是通过测量土壤表面反射或发射的电磁能量,探讨遥感获取的信息与土壤水分之间的关系,从而反演出地表土壤水分^[59]。用遥感的方法监测土壤水分可以得到土壤水分在空间上的分布状况和时间上的变化情况^[60],监测范围广,速度快,成本低,具备进行长期动态监测的优势,是目前研究的重点。由于遥感获取的参数与土壤水分的关系复杂,用遥感方法获取土壤水分信息也是目前研究的难点。遥感技术具有大面

积同步观测,时效性、经济性强的特点,为大面积动态监测土壤水分提供了可能。

地球化学方法主要体现在同位素方法的应用,同位素方法为土壤水的研究提供了一种有效的新手段。应用同位素理论和方法可有效解决土壤水的来源、分布和运移等问题,揭示出土壤水运动的本质规律。另外,还可以应用元素地球化学循环的理论和方法对土壤水进行研究。目前土壤水地球化学研究进展缓慢,主要是受到土壤水取样方法的限制,研究所需水样量不足,进而导致土壤水全面而系统的地球化学研究无法开展。所以,加强土壤水取样方法的探讨及土壤水地球化学特征的研究,采用多种研究途径和方法,以期全面的揭示土壤水的本质特征及运移规律。

4 存在的问题及今后的研究重点

就目前的土壤水研究来看,已取得了一系列的成果和快速的发展。但是,由于土壤水的特殊性和复杂性,致使土壤水的研究还存在许多不足,有待于进一步完善。存在的问题和今后的研究重点主要体现在以下几个方面。

(1)在相当长的时期内,土壤水分的研究主要集中在农业生产方面,定性的描述或用各种传统的方法处理实践中不断遇到的土壤水问题。而在生态恢复中的研究不足,尤其在西南喀斯特地区的研究更需要加强,为指导石漠化治理提供理论依据;其次,当前的研究主要局限于相对小的空间尺度,在一些“点”上开展,对于大尺度、大范围的土壤水异质性无从解释,不具有代表性。所以,在不同地区、不同尺度下,由点到面、宏观到微观的开展土壤水研究是今后的重点之一,进而揭示土壤水随时空的变化规律。

(2)土壤水的运移规律、动力学特征及其模拟模型的研究涉及面广,它的发展和提高将有助于对土壤水资源属性的认识、土壤水分的有效利用等方面实际问题的解决,进一步加深土壤水运动理论的研究是具有重要的意义。

(3)关于土壤水的定义还未统一,土壤水水量计算及资源的评价方面的研究也还存在许多不确定性,研究的内容和方法尚未形成统一的共识。所以,土壤水的定义、土壤水水量计算及资源的评价仍是研究的重点之一,进一步阐述土壤水的资源属性、理论、内涵,建立土壤水资源的评价方法及评价指标体系。

(4)同位素及元素地球化学循环理论和方法的应用可以进一步揭示出土壤水的地球化学特性,如元素组成、来源及分布等。受土壤水取样的制约,土壤水地球化学研究进展缓慢。基于此,土壤水取

样方法的研究和土壤水地球化学特征研究都须加强。

(5)在破坏生态系统的修复、重建等的研究中,土壤水的高效利用问题仍是生态恢复的主题;对土壤污染和地下水污染等环境问题的研究,从土壤水来进行分析是一个有效的途径。

综上所述,当前的土壤水研究主要集中在土壤水的物理特性、土壤水的利用等方面,研究面不广,认识不全面,很难揭示土壤水的本质。今后,土壤水的研究要从各种方法手段(物理方法、地球化学方法、遥感技术等)入手,对各个方向(水分利用、生态恢复、环境治理等)进行研究,促使土壤水的研究朝着多学科、综合性、前沿性、应用性的方向发展,达到理论和实践的结合。

参考文献:

- [1] 雷志栋,胡和平,杨诗秀.土壤水研究进展与评述[J].水科学进展,1999,10(03):311-318.
LEI Zhidong, HU Heping, YANG Shixiu. A review of soil water research[J]. Advances in Water Science, 1999, 10(3): 311-318.
- [2] STEKAUEROVA V, NAGY V, KOTOROVA D. Soil water regime of agricultural field and forest ecosystems[J]. Biologia, 2006, 61(19): 300-304.
- [3] 李宝庆.土壤水研究的进程和展望[J].地理研究,1989,8(3):102-108.
LI Baoqing. The development and prospect of soil water study[J]. Geographical Research, 1989, 8(3): 102-108.
- [4] ROBOCK A, VINNIKOV K Y, SRINIVASAN G, et al. The global soil moisture data bank[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(6): 1281-1299.
- [5] GERTEN D, HOFF H, BONDEAU A, et al. Contemporary "green" water flows: Simulations with a dynamic global vegetation and water balance model[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30: 334-338.
- [6] BAKER J H. Measurement of soil water content[J]. Remote Sensing Reviews, 1990, 5: 263-279.
- [7] GASKIN G J, MILLER J D. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63(2): 153-159.
- [8] GARDNER C M K, DEAN T J, COOPER J D. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 71(4): 395-403.
- [9] SEYFRIEND M S, MURDOCK M D. Measurement of soil water content with a 50-MHz soil dielectric sensor[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(2): 394-403.
- [10] ISHIZUKA M, MIKAMI M. Measurement of soil water content in a hyper-arid environment using time-domain reflectometry sensors[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(19): 3911-3920.
- [11] WU L, SKAGGS T H, SHOUSE P J, et al. State space analysis of soil water and salinity regimes in a loam soil underlain by shallow groundwater[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(4): 1065-1074.
- [12] ZHANG N, FAN G, LEE K H, et al. Simultaneous measurement of soil

- water content and salinity using a frequency-response method[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(5): 1515-1525.
- [13] WITTLER J M, CARDON G E, GATES T K, et al. Calibration of electromagnetic induction for regional assessment of soil water salinity in an irrigated valley[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce*, 2006, 132(5): 436-444.
- [14] AHMED B A O, YAMAMOTO T, RASIAH V, et al. The impact of saline water irrigation management options in a dune sand on available soil water and its salinity[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 88(1/3): 63-72.
- [15] SALA O E, LAUENROTH W K, PARTON W J, et al. Long-term soil-water dynamics in the short grass steppe[J]. *Ecology*, 1992, 73(4): 1175-1181.
- [16] TIKTAK A, BOUTEN W. Modeling Soil-water dynamics in a forested ecosystem .3. Model description and evaluation of discretization[J]. *Hydrological Processes*, 1992, 6(4): 455-465.
- [17] KENNEDY G W, PRICE J S. Simulating soil water dynamics in a cutover bog[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(12): 13.
- [18] LACZOVA E, STEKAUEROVA V. Soil water dynamics of the hill-side[J]. *Cereal Research Communications*, 2007, 35(2): 705-708.
- [19] 邵晓梅, 严昌荣, 徐振剑. 土壤水分监测与模拟研究进展[J]. *地理科学进展*, 2004, 23(3): 58-66.
SHAO Xiaomei, YAN Changrong, XU Zhenjia. Progress in monitoring and simulation of soil moisture[J]. *Progress in Geography*, 2004, 23(3): 58-66.
- [20] OREN R, PHILLIPS N, KATUL G, et al. Scaling xylem sap flux and soil water balance and calculating variance: a method for partitioning water flux in forests[J]. *Annales Des Sciences Forestieres*, 1998, 55(1/2): 191-216.
- [21] WILSON K B, HANSON P J, MULHOLLAND P J, et al. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 106(2): 153-168.
- [22] KENDY E, GERARD M P, WALTER M T, et al. A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(10): 2011-2031.
- [23] DALY E, PORPORATO A. Impact of hydroclimatic fluctuations on the soil water balance[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(6): 11.
- [24] SHIKLOMANOV I A. Appraisal and assessment of world water resources[J]. *Water International*, 2000, 25(1): 11-32.
- [25] 靳孟贵, 张人权, IAN SIMMERS, 等. 土壤水资源评价的研究[J]. *水利学报*, 1999, (8): 30-34.
JIN Menggui, ZHANG Renquan, IAN SIMMERS, et al. Study on evaluation of soil water resources[J]. *Shuili Xuebao*, 1999, (8): 33-34.
- [26] 夏自强, 李琼芳. 土壤水资源及其评价方法研究[J]. *水科学进展*, 2001, 12(4): 535-540.
XIA Ziqiang, LI Qiongfang. Study on soil water resource and its evaluating methodology[J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(4): 535-540.
- [27] 周凌云, 陈志雄, 李卫民. 土壤水资源合理利用潜力评价[J]. *土壤通报*, 2003, 34(1): 15-18.
ZHOU Lingyun, CHEN Zhixiong, LI Weimin. Evaluation of utilization potential of soil water resource[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(1): 15-18.
- [28] 王浩, 杨贵羽, 贾仰文, 等. 土壤水资源的内涵及评价指标体系[J]. *水利学报*, 2006, 37(4): 389-394.
WANG Hao, YANG Guiyu, JIA Yangwen, et al. Connotation and assessment index system of soil water resources[J]. *Shuili Xuebao*, 2006, 37(4): 389-394.
- [29] GEHRELS J C, PEETERS J E M, DE VRIES J J, et al. The mechanism of soil water movement as inferred from O-18 stable isotope studies[J]. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 1998, 43(4): 579-594.
- [30] ROBERTSON J A, GAZIS C A. An oxygen isotope study of seasonal trends in soil water fluxes at two sites along a climate gradient in Washington state (USA)[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(1/2): 375-387.
- [31] YANO K, SEKIYA N, SAMSON B K, et al. Hydrogen isotope composition of soil water above and below the hardpan in a rained lowland rice field[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96(2/3): 477-480.
- [32] LEE K S, KIM J M, LEE D R, et al. Analysis of water movement through an unsaturated soil zone in Jeju Island, Korea using stable oxygen and hydrogen isotopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 345(3/4): 199-211.
- [33] 田立德, 姚檀栋, TSUJIMURA M, 等. 青藏高原中部土壤中稳定同位素变化[J]. *土壤学报*, 2002, 39(3): 289-295.
TIAN Lide, YAO Tandong, TSUJIMURA M, et al. Stable isotope in soil water in the middle of Tibetan Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 289-295.
- [34] 张超, 王会肖. 土壤水分研究进展及简要评述[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(4): 117-120, 125.
ZHANG Chao, WANG Huixiao. A brief review of advances in soil water research[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(4): 117-120.
- [35] 张北赢, 徐学选, 李贵玉, 等. 土壤水分基础理论及其应用研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(2): 122-129.
ZHANG Beiyang, XU Xuexuan, LI Guiyu, et al. Review of the research on the basic theoretics and its application of soil water[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(2): 122-129.
- [36] PORPORATO A, DALY E, RODRIGUEZ I I. Soil water balance and ecosystem response to climate change[J]. *American Naturalist*, 2004, 164(5): 625-632.
- [37] JASPER K, CALANCA P, FUHRER J. Changes in summertime soil water patterns in complex terrain due to climatic change[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 327(3/4): 550-563.
- [38] GRAYSON R B, WESTERN A W. Towards area estimation of soil water content from point measurements: time and space stability of mean response[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 207: 68-82.
- [39] 刘苏峡, 刘昌明. 90年代水文学研究的进展和趋势[J]. *水科学进展*, 1997, 8(4): 365-369.
LIU Suxia, LIU Changming. Challenges of hydrology since 1990s[J]. *Advances in Water Science*, 1997, 8(4): 365-369.
- [40] RITSEMA C J. Special issue: preferential flow of water and solutes in soils[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 215: 1-3.
- [41] 王军, 傅伯杰, 蒋小平. 土壤水分异质性的研究综述[J]. *水土保持研究*, 2002, 9(1): 1-5.
WANG Jun, FU Bojie, JIANG Xiaoping. Review on research of soil moisture heterogeneity[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(1): 1-5.
- [42] 肖洪浪, 李锦秀, 赵良菊, 等. 土壤水异质性研究进展与热点[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(9): 954-959.
XIAO Honglang, LI Jinxu, ZHAO Liangju, et al. Research progress

- and highlights of soil water heterogeneity[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(9): 954-959.
- [43] HEUER B, NADLER A. Physiological response of potato plants to soil salinity and water deficit[J]. *Plant Science*, 1998, 137(1): 43-51.
- [44] SHANI U, DUDLEY LM. Field studies of crop response to water and salt stress[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65: 1522-1528.
- [45] MUNNS R. Comparative physiology of salt and water stress[J]. *Plant Cell Environ*, 2002, 25: 239-250.
- [46] BUCKINGHAM E. Studies on the movement of soil moisture U S[J]. Department of Agriculture, 1907.
- [47] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. *Physics*, 1931, 1: 318-333.
- [48] KLUTE A. A numerical method of solving the flow equation for water in unsaturated materials[J]. *Soil Science*, 1952, 73.
- [49] PHILIP J R, VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. *Am Geophys Union Trans*, 1957.
- [50] PHILIP J R. Plant water relations: some physical aspects[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1966, 17: 245-268.
- [51] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- LEI Zhidong, YANG Shixiu, XIE Senchuan. *Soil Water Dynamics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [52] 杨邦杰. 土壤蒸发过程的数值模型及其应用[M]. 北京: 学术书刊出版社, 1989.
- YANG Bangjie. *Soil Evaporation Numerical Model and its Application*[M]. Beijing: Academic Press, 1989.
- [53] 康绍忠. 土壤-植物-大气连续体水热动态模拟的研究[J]. *生态学报*, 1991, 11(3): 256-261.
- Kang Shaozhong. Simulation on water and heat dynamics in Soil-Plant-Atmosphere Continuum[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1991, 11(3): 256-261.
- [54] 王靖, 于强, 潘学标, 等. 土壤-植物-大气连续体水热、CO₂通量估算模型研究进展[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2843-2853.
- WANG Jing, YU Qiang, PAN Xuebiao, et al. A review on water, heat and CO₂ fluxes simulation models[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2843-2853.
- [55] BUDAGOVSKII A I, BUSAROVA O E. Basis of methods to evaluate changes in soil water resources and over runoff for different climate change scenarios[J]. *Water Resources*, 1991, 18(2): 111-120.
- [56] MALI N, URBANC J, LEIS A. Tracing of water movement through the unsaturated zone of a coarse gravel aquifer by means of dye and deuterated water[J]. *Environmental Geology*, 2007, 51(8): 1401-1412.
- [57] SIDLE W C. Environmental isotopes for resolution of hydrology problems[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1998, 52(3): 389-410.
- [58] 汪潇, 张增祥, 赵晓丽, 等. 遥感监测土壤水分研究综述[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 157-163.
- WANG Xiao, ZHANG Zengqiang, ZHAO Xiaoli, et al. A review of researches on monitoring of soil moisture by remote sensing[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 157-163.
- [59] GILLIES R R, CARLSON T N. Thermal remote-sensing of surface soil-water content with partial vegetation cover for incorporation into climate-models[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 34(4): 745-756.
- [60] MATTIKALLI N M, ENGMAN E T, JACKSON T J, et al. Microwave remote sensing of temporal variations of brightness temperature and near-surface soil water content during a watershed-scale field experiment, and its application to the estimation of soil physical properties[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34(9): 2289-2299.

Comments on the progress and direction in soil water research

XIAO De'an^{1,2}, WANG Shijie^{1*}

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry//Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang, Guizhou 550002, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: Soil water is the most important and complex part of water resources, which is closely related to atmospheric water, surface water, ground water and vegetation. Currently, there are many researches carried out in this field, such as ecological restoration, environment governing, as well as reasonable usage of water resources, which aiming to push agricultural production effectively. The authors firstly reviewed the research progress and results of those studies of soil water, and then, as the main purpose, to analyze the problem in its research direction. Previous studies of soil water are mainly focused on its physical properties, such as soil water content and usage, salt content and its migration laws, soil water dynamics and its model simulation, soil water quantity and its equilibrium studies, etc. However, only a few on its chemical properties, especially for its geochemical characteristics. As one of the most important properties for soil water, the geochemical characteristics would determine the migration laws of soil water. meanwhile, studies in the geochemical field are only about isotope geochemical research, and still yet blank when it comes to geochemical cycling of soil water elements and studies concerning environmental pollution, due to the difficulty in soil water sampling. Thus, in order to understanding the properties and migration laws of soil water, we strongly propose that study on the geochemical characteristics of soil water should be greatly enhanced, including improving experimental technique and accumulating research experience.

Key words: soil water; physical properties; geochemical characteristics; research progress; research directions