



## 黄土高原生态建设与土壤干燥化\*

文 / 邵明安<sup>1,2</sup> 王云强<sup>3</sup> 贾小旭<sup>1</sup>

1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室

北京 100101

2 中国科学院/水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室

杨凌 712100

3 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室 西安 710061



中国科学院

**【摘要】**黄土高原是古代中华文明的发祥地,由于气候变化和人类活动干扰,该区水土流失严重,生态环境脆弱。土壤水是黄土高原植被建设与生态恢复的重要资源,土壤水问题的未来发展趋势对黄土高原生态文明建设具有极其重要的影响。文章从黄土高原气候变化趋势、退耕还林还草工程建设成效及其引发的土壤干燥化问题等方面,讨论了当前黄土高原生态文明建设中资源与环境面临的突出问题。重点分析了土壤干燥化的概念、特征、环境效应及其调控等研究进展,在此基础上提出黄土高原土壤干燥化问题的未来研究方向和面向生态文明建设的土壤水资源管理策略与目标,以期为国家及黄土高原生态建设决策提供科学依据。

**【关键词】**黄土高原,气候变化,生态文明建设,土壤干燥化,土壤水资源管理

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2015.Z1.013

黄土高原是指日月山-贺兰山以东、太行山以西、秦岭以北、阴山以南的广大地区,总面积约64万平方公里,是古代中华文明的发祥地,也是我国重要的能源化工基地,在国民经济社会发展中具有重要战略意

义。黄土高原土壤质地疏松多孔,易于搬运;受大陆性季风气候的影响,加之强烈的人类活动干扰,该区水土流失严重,生态系统服务功能偏低,是我国典型的生态脆弱区 and 环境敏感区,也是全球重大生态环境问题最突出的地区之一<sup>[1]</sup>。2012年11月召开的党的“十八大”将生态文明建设提到了前所未有的高度,这将有利于黄土高原脆弱区资

\* 基金项目:国家自然科学基金(51179180)

修改稿收到日期:2015年6月3日

源、环境和生态保护目标切实纳入国家及地方发展的综合决策,对我国黄河流域自然环境和生态系统的改善、经济社会的可持续发展和长治久安等至关重要。

黄土高原土层深厚,地下水位大都介于30—80米之间,几乎不参与土壤-植被-大气传输体(Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer system, SVATs)中的水循环过程。降水是该区农业生产和生态恢复的主要水源。然而,黄土高原天然降水量少,年际变幅大且年内分布不均,导致生长期内的降水常常不能满足植物生长的需求。因此,干旱季节植物生长所需水分在很大程度上依赖于土壤储水。“土壤水库”功能的维持是黄土高原坡面植被建设的关键,直接影响植被建设成效<sup>[2-4]</sup>。生态文明建设必须以资源环境承载力为基础,以自然规律为准则,建设以可持续发展为目标的资源节约型、环境友好型社会。因此,黄土高原土壤水资源问题的现状特征及未来发展构成了该区生态文明建设顺利实施和目标顺利实现的重要因素。

近50年研究表明,在降水量少、植物蒸腾量大、人类剧烈活动等过程的长期共同作用下,黄土高原的土壤水分负平衡现象频繁发生,土壤干燥化严重,土壤干层的空间分布范围有增大趋势。土壤干层的形成会负面影响陆地生态系统中的生物小循环和水文大循环,甚至威胁已经取得的植被建设成效和区域生态安全。因此,深入探讨土壤干燥化发生机理、发展趋势,预估可能的生态环境效应,进而提出科学合理的调控对策,是当前黄土高原生态文明建设的客观需求,具有重要现实意义。本文将简要介绍黄土高原在气候变化、植被建设背景下土壤干燥化研究取得的成果,并提出亟需深入研究的相关科学问题,以期为黄土高原生态文明建设提供科学依据。

## 1 黄土高原气候暖干化趋势明显

20世纪初以来,全球陆地平均气温呈不断上升趋势<sup>[5]</sup>。在全球变化背景下,黄土高原近100年(1880—2000年)气温持续升高,年降水平均减少

了100 mm,气候较过去变得暖干<sup>[6]</sup>,生态环境受到严重影响。近50年数据也表明,黄土高原1961—2010年的平均气温增长1.91℃,年降水量减少29.11 mm,暖干化趋势明显<sup>[7]</sup>。未来几十年我国温度仍会持续上升,到2050年我国大部分地区将升高2℃—3℃,部分地区将升高4℃,尤其是我国西部黄土高原地区,气温更趋于变暖<sup>[6,8]</sup>。干旱指数分析表明,从1971—2010年黄土高原的西部受干旱影响的面积呈增加趋势,而东部为下降趋势;极端气温变得更加频繁和严重<sup>[9]</sup>。显著的气候变化及频发的极端气候事件加剧了黄土高原脆弱生态系统的的不稳定性,增加了区域植被建设的难度。黄土高原成为我国重大生态环境问题最突出的地区之一。

## 2 黄土高原生态环境建设成效显著

近60年来,党和国家高度重视黄土高原生态建设。1997年原国家主席江泽民提出“再造一个山川秀美的西北地区”;1999年原国务院总理朱镕基对黄土高原严重的水土流失给予极大关注,并提出“退耕还林(草)、封山绿化、个体承包、以粮代赈”的16字措施;2000年的“西部大开发”战略也将黄土高原水土流失治理、植被恢复重建和生态环境恢复作为战略重点之一。大规模生态建设明显改善黄土高原的生态环境,植被覆盖指数显著提高。特别是1999年实行退耕还林(草)工程以来,黄土高原土地利用格局及植被覆盖发生显著变化,林、草地面积增加11.5%,农地减少10.8%<sup>[10-14]</sup>。1999年以来,归一化植被指数增加明显,其中黄土高原丘陵沟壑区增加趋势最为显著,归一化植被指数提高10%和20%以上的区域占总面积的72.5%和36.4%<sup>[10,11]</sup>。植被恢复使黄土高原24%的地区土壤侵蚀得到有效控制,植被盖度从1970年的6.5%增加至2010年的51%<sup>[15]</sup>。黄土高原植被恢复措施及相应的沟道水利措施显著降低了入黄泥沙量<sup>[13,14,16]</sup>。据统计,年均输沙量由20世纪70年代前的16亿吨锐减到近10年的3.1亿吨。

总的来说,黄土高原生态建设成效已取得显

著成绩。但黄土高原几十年来的人工林草建设,也出现一些不合理现象。如,追求人工林草的高生长量、高经济效益,引进种植外来高耗水植物种(如乔木树种刺槐、灌木树种柠条、草本植物苜蓿、沙打旺等)。这样极大地消耗土壤水分,导致“土壤水库”功能减弱,产生了以土壤水分失衡、土壤干燥化为特点的环境问题<sup>[17-19]</sup>。与此同时,黄土高原气候暖干化趋势,导致土壤蒸发增加,并减小降水对土壤水分的补给,进一步加剧土壤水分负平衡的强度,土壤干燥化严重,影响了黄土高原生态文明建设质量。根据野外实际测定,当前黄土高原地区土壤干层广泛分布,人工林地干层厚度超过3 m<sup>[20]</sup>。

### 3 黄土高原的土壤干燥化问题

#### 3.1 土壤干层的形成与特征

土壤干层是指位于多年平均降雨入渗深度以下,因植物蒸腾和土壤蒸发导致土壤水分长期处于负平衡,在土壤剖面上形成厚度不等的干燥化土层。“土壤干层”的提出已有一个世纪的历史。1893年俄国学者首次发现在草原环境下人工林地存在“干燥化死层”<sup>[21]</sup>;1963年中科院/水利部水土保持所土壤水分组在黄土高原(陕西蒲城)也发现土壤干层;1979年德国学者再次证明棕色森林土壤存在下伏土壤干层<sup>[22]</sup>。尽管世界上很多地区有土壤干燥化的研究报道,但由于我国黄土高原土层深厚,大气蒸发潜力大,降水量有限,人类活动对自然生态系统干扰大,因而广泛存在土壤干层。大量实地测定结果表明,人工植被下的土壤含水量非常低,0—10 m剖面土壤含水量接近凋萎湿度,存在严重的下伏土壤干土层。因此,我国黄土高原的土壤干燥化状况具有典型性和代表性,并且关于土壤干燥化的研究成果大都来自黄土高原。

土壤干层的含水量上限是土壤稳定湿

度<sup>[18]</sup>。土壤稳定湿度作为土壤干层的判定阈值,在数值上相当于田间持水量的50%—80%,具体取值与土壤质地有关,即质地愈粗,值愈小<sup>[23]</sup>。基于土壤稳定湿度,提出了描述土壤干层的相应指标,包括:(1)土壤干层厚度;(2)干层内平均土壤含水量;(3)土壤干层起始形成深度<sup>[18,24]</sup>。土壤干层具有3个显著特征:(1)位于土体某一深度范围内;(2)土壤含水量处于低水平状态;(3)具有相对持久性<sup>[18]</sup>。同时,土壤干层存在必须具备3个条件:(1)气候条件,大气蒸发力大于降水量;(2)土壤条件,土层厚,地下水位深;(3)植被条件,深根系的植物。因此,只要满足这3个条件的世界上的任何地区,均有下伏土壤干层存在的可能<sup>[19]</sup>。

#### 3.2 土壤干燥化的生态环境效应

土壤干燥化是气候干旱化和植被过度耗水两个方面综合作用的结果<sup>[25]</sup>。土壤干燥化对生态系统具有潜在影响,主要表现为阻碍或减缓土壤水分上下层之间的交换,削弱“土壤水库”的调节功能,降低土壤质量,严重的土壤干燥化会导致植被退化或死亡、土地生产力降低等<sup>[26-28]</sup>。研究表明,黄土高原人工植被生长到6—10年后就开始退化,大都成为“小老树”(几乎占到该地区面积的40%),其水土保持、涵养水源等生态服务功能衰退甚至丧失,这在很大程度上与土壤干燥化的发生有关<sup>[29]</sup>。土壤干层的持续存在会影响灌丛群落向次生林方向的演替,若遇连续干旱,由于土壤供水能力差,很可能导致植被完全衰败甚至大规模死亡,而衰败后的林草地再造林难度更大<sup>[25,27]</sup>。另一方面,土壤干燥化发生后,会减少降水转化为地下水的比例,影响区域水循环的过程与路径<sup>[30]</sup>。当前,在全球环境变化背景和人类活动深刻影响下,黄土高原传统的地理-生态过程正发生深刻变化<sup>[31]</sup>，“土壤水库”的调节功



中国科学院

能愈来愈不稳定,土壤干燥化程度也在加剧。土壤水资源的不足,必然会影响人工植被的生长发育和生态系统的稳定性,从而限制黄土高原植被的大面积恢复,影响整个区域的生态文明建设和可持续发展。

### 3.3 黄土高原土壤干层分异特征

为确定黄土高原土壤干燥化的分布状况,一些学者对黄土高原地区58个县土壤水资源状况进行调查发现黄土高原土壤干燥化普遍发生,土壤干层厚度在不同气候区和不同植被类型间存在如下分布特征:半湿润区<半干旱区<干旱区;农田<自然草地<灌木林、人工草地<乔木林<sup>[32]</sup>。在中尺度上,植被类型、坡向及坡度可作为土壤干燥化是否发生的指示因子;同时,受降雨量的影响,土壤干化程度具有明显的水平分异规律,即随着降雨量从南到北的减少,干化程度亦随之加重<sup>[19]</sup>。对柠条和苜蓿两种植被的长期定位研究表明,苜蓿地从第2年开始就有干层的发育现象,而柠条地则从第3年开始;在土壤干层发育初期,苜蓿地的土壤干层厚度大于柠条地,而在生长后期(30年),柠条植被下土壤干层的厚度大于苜蓿地<sup>[33]</sup>。通过测定深剖面土壤水分发现,苜蓿、人工柠条林和人工油松林植被下的耗水深度分别可达15.5 m, 22.4 m和21.5 m<sup>[34]</sup>。整体上,受地域、植被类型、生长年限等的影响,土壤干层的干燥化程度、干层厚度、耗水深度将有所不同,进而表现出明显的时空异质性。

### 3.4 土壤干燥化模拟与预测

借助模型手段,通过综合观测与数据集成,结合数学模拟,评估各个生态水文过程对土壤水分的影响,是揭示不同环境条件下土壤水分主控因子的重要手段<sup>[35-37]</sup>,对预估未来土壤水资源发展趋势,指导制定相应的调控策略具有重要意义。目前,一些学者开发或改进了适用于旱区的生态水文模型<sup>[35,38,39]</sup>,例如将与土壤水分相关的生态水文过程与生物地球化学循环过程有机结合而形成的土壤水分植被承载力模型<sup>[39]</sup>,等。已建立的生态

水文模型为定量评估土壤水分的主控因素提供了技术手段,有助于深入研究黄土高原土壤干燥化问题。此外,一些学者还通过建立或引入模型,结合野外实地观测与模型验证,对与黄土高原土壤干燥化相关的过程进行了模拟和预估<sup>[4,40]</sup>。例如,Huang和Gallichand<sup>[24]</sup>采用SHAW模型,模拟研究了32年苹果园的0—10 m土壤干层恢复状况,发现土壤干层的恢复平均需要13.7年。Wang等人<sup>[41]</sup>运用EPIC模型模拟了土壤干层的动态演变,指出黄土区半湿润区苜蓿的种植年限不宜超过10年。这些基于模型的土壤干层调控研究深化了对土壤干层动态、演变趋势的研究,对黄土高原植被建设决策具有一定的指导意义,但这些研究大都集中在点、小区或者坡面尺度上。事实上,小流域作为黄土区综合治理的基本单元,在小流域或者更大尺度上的土壤干层预测模型研究更具重要性和实践性。

## 4 土壤干燥化问题未来研究方向

### 4.1 土壤干燥化的发生机理与判别指标

土壤干燥化是气候干旱化和植被耗水两个方面综合作用的结果。然而,目前仅从宏观上进行了分析和描述,而没有从微观方面深入研究土壤干燥化发生的机理机制,缺乏对植被水分生理特性、生态适应性、土壤水分消耗和补给等过程和相互关系的长期观测与分析。

目前土壤干燥化的量化指标仅考虑了土壤水力学特性,土壤干燥化判别和量化指标的研究还不够深入,且缺乏统一的标准。从土壤物理学角度,选择土壤稳定湿度这个静态指标来定量研究土壤干燥化强度,并不能很好反映土壤水分状况与植被系统的互馈关系。例如,土壤干层形成以后,干层内的土壤水分可供某些植被根系进一步吸收利用,即干层内水分仍参与SVATs中水分循环。此时,基于土壤稳定湿度的干燥化判别方法不能够揭示植被生理生态特征是否发生了显著变化,更不能反映植被生理生态特征发生显著变化时的土壤水能态与土壤干层的相互关系。因此,



选择 SVATs 中水分运动的土壤水动力学指标(土壤水基质势)和植物生理生态临界指标来优化土壤干燥化判定方法,可使土壤干燥化研究更加科学合理,进而科学评估黄土高原土壤水资源植被承载力,为该区生态建设提供依据。

#### 4.2 土壤水分的时空变异性问题

掌握区域土壤水资源时空分异特征对宏观把握黄土高原生态建设策略具有重要作用。有关土壤水分及土壤干燥化的空间分布及时间动态,目前还处于定性的描述阶段(例如,从东南向西北方向,气候渐趋干燥、降雨逐渐减少,土壤持水性能渐次降低、蒸发性能渐趋增高、土壤稳定湿度逐渐减小、深层储水渐次降低,因而土壤干燥化程度渐趋严重,干层厚度逐渐加深),缺乏大量实测数据的支撑,这对黄土高原土壤干层的预防与调控、植被建设与布局来说是不够的,有可能使已有的黄土高原生态建设效果逆转,进而阻碍该区生态文明建设。由于尺度较大,难以在较短时间内获得同一时期的剖面土壤水分数据,进而不利于区域尺度上土壤干燥化状况的对比。因此,需要科学地制定采样方法,包括合理采样数、样点布设与采样代表性问题。此外,点数据向面数据的转化问题,针对不同的采用策略,选择何种空间分析方法来实现未测点的估计和面数据的获取,还需要进一步的探索。

#### 4.3 土壤干燥化过程模型构建

在全球变化背景下,模拟预估未来土壤干燥化过程及其可能的生态环境效应,有利于未来国家及地方制定应对气候变化的生态环境政策。已有生态水文模型大都只考虑了较浅土层的土壤水分过程(通常 $<1\text{ m}$ ),对深层土壤水分考虑较少,在应用到黄土高原土壤干燥化模拟时需要拓展土层深度。更重要的是,已有模型未考虑植被根系分布

特征、中低水势土壤水分过程及植被生长年限的影响,极大限制了这些模型在土壤干燥化模拟预报方面的应用。因此,基于模拟效果较好的土壤水分植被承载力模型,通过改进相关过程子模型,提高模型预测精度,将有助于进一步揭示土壤干燥化的发生发展过程与演变机制。

#### 4.4 植被建设的土壤水资源管理策略与目标

(1)在气候暖干化背景下,黄土高原人工植被建设应加强对天然植被格局与生态水文效应、具有水力提升功能植物的识别、植物吸收水分来源、生态需水量及生态地下水水位等方面的研究,从恢复生态学和生态水文学的角度,确定该区适宜人工植被的种类组成和格局。采取以耗水量小、耐旱的乡土树种为主、外来物种为辅的植被建设途径,提升人工林涵养水源的功能以应对未来气候暖干化对该区生态文明建设的威胁。

(2)种植密度是调控土壤水分与植被生长的有效方式,确定密度的常用方法是基于水量平衡原理,计算雨水资源中补给土壤的水量所能维持植物健康生长的植物个体数量,进而建立密度与林冠截留、地表径流、土壤水分补给、土壤水分消耗的关系。通过密度调控或适当引种乡土树种来改造现有脆弱人工生态系统,提升人工生态系统的生态服务功能及其适应气候变化和抵抗外界干扰的能力。

(3)黄土高原地形复杂,小气候差异大,应充分考虑自然条件和人为活动现状,从土地利用管理、树草种类型、种植密度、降水分配、微地形改造等方面综合出发,利用土壤水分植被承载力模型模拟预估不同流域、不同地形地貌土壤水资源植被承载力,进而科学构建不同的生态系统,以提高土壤水资源利用效率和实现人工生态系统可持续发

展。这既是当前土壤干燥化问题研究的深入,又是实现黄土高原植被建设的重要保障。

### 参考文献

- 1 孙鸿烈. 中国生态问题与对策. 北京: 科学出版社, 2011.
- 2 朱显谟. 重建土壤水库是黄土高原治本之道. 科技与社会, 2006, 21(4): 320-324.
- 3 Chen L D, Wang J P, Wei W, et al. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau region, China. *Forest and Ecology Management*, 2010, 259(7): 1291-1298.
- 4 Liu W Z, Zhang X C, Dang T H, et al. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern loess plateau of china. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1133-1138.
- 5 IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 2007.
- 6 周晓红, 赵景波. 黄土高原气候变化与植被恢复. *干旱区研究*, 2005, 22(1): 116-119.
- 7 Wang Q X, Fan X H, Qin Z D, et al. Changes trends of temprature and precipitation in the Loess Plateau Region of China, 1961-2010. *Global and Planetary Change*, 2012, 92: 138-147.
- 8 施雅风. 全球气候变暖. 济南: 山东科学技术出版社, 1996.
- 9 Li Z, Zheng F L, Liu W Z, et al. Spatial distribution and temporal trends of extreme temprature and precipitation events on the Loess Plateau of China during 1961-2007. *Quaternary International*, 2010, 226: 92-100.
- 10 信中保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(11): 1504-1514.
- 11 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近 30a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 287-293.
- 12 Feng X M, Fu B J, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2846.
- 13 Fu B J, Liu Y, Lü Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8: 284-293.
- 14 Lü Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A Policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China. *PLOS One*, 2012, 7(2): 1-10.
- 15 Wang S, Fu B J, Gao G Y, et al. Soil moisture and evapotranspiration of different land cover types in the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16: 2883-2892.
- 16 刘昌明. “绿水”研究与生态维护的探讨. *流域水环境保护与技术创新论坛*, 2013-02-26, 北京.
- 17 杨文治, 邵明安, 彭新德, 等. 黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28(4): 357-365.
- 18 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. *生态学报*, 1983, 3(2): 91-101.
- 19 王力, 邵明安, 张青峰. 陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 436-442.
- 20 Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. Investigation of factors controlling the regional-scale distribution of dried soil layers under forestland on the Loess Plateau, China. *Survey Geophysics*, 2012, 33: 311-330.
- 21 Высоцкий Г Н. Избранные ТрудыИзд, Изд. No304. Москва: Сельхозгиз, 1960, 31-67.
- 22 Walter H. *Vegetation of the Earth*. Spriner-Verlag: New York Inc, 1979.
- 23 Chen HS, Shao MA, Li YY. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2008, 143: 91-100.
- 24 Huang M B, Gallichand J. Use of the shaw model to assess soil water recovery after apple trees in the gully region of the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(1-2): 67-76.
- 25 李裕元, 邵明安. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植物多样性研究. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2321-2327.
- 26 Breshears D D, Cobb N S, Rich P M, et al. Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(42): 15144-15148.
- 27 Czerepko J. A long-term study of successional dynamic in the forest wetlands. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(3-4): 630-642.
- 28 Wang L, Wei S P, Shao H B, et al. Simulated water balance of forest and farmland in the hill and gully region of the Loess Plateau of



China. *Plant Biosystem*, 2012, 146: 226-243.

29 侯庆春, 黄旭. 黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究. *水土保持学报*, 1991, 5(1): 64-72.

30 黄明斌, 杨新民, 李玉山. 黄土高原生物利用型土壤干层的水文生态效应研究. *中国生态农业学报*, 2003, 11(3): 113-116.

31 傅伯杰, 赵文武, 陈利顶. 地理-生态过程研究的进展与展望. *地理学报*, 2006, 61: 1123-1131.

32 韩仕峰, 李玉山, 石玉洁, 等. 黄土高原土壤水分资源特征. *水土保持通报*, 1990, 10(1): 36-43.

33 Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1-2): 9-17.

34 Wang Z Q, Liu B Y, Liu G, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 52(6): 835-842.

35 傅伯杰, 杨志坚, 王仰麟. 黄土丘陵沟壑区坡地土壤水分空间分布数学模型. *中国科学D辑: 地球科学*, 2001, 31

(3): 185-191.

36 程国栋, 赵传燕. 干旱区内陆河流域生态水文综合集成研究. *地球科学进展*, 2008, 23(10): 1005-1012.

37 王根绪, 钱鞠, 程国栋. 生态水文科学研究的现状与展望. *地球科学进展*, 2001, 16(3): 314-323.

38 韩兰英, 张强, 贾建英, 等. 石羊河流域土壤含水量生态水文模型研究. *土壤通报*, 2014, 45(2): 352-357.

39 Xia Y Q, Shao M A. Soil water carrying capacity for vegetation: A hydrologic and biogeochemical process model solution. *Ecological Modelling*, 2008, 214(2-4): 112-124.

40 Wang L, Wang Q J, Wei S P, et al. Soil desiccation for loess soils on natural and regrown areas. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2467-2477.

41 Wang X C, Li J, Tahir M N, et al. Validation of the epic model and its utilization to research the sustainable recovery of soil desiccation after alfalfa (*Medicago sativa* L.) by grain crop rotation system in the semi-humid region of the Loess Plateau. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 161: 152-160.

## Ecological Construction and Soil Desiccation on the Loess Plateau of China

Shao Ming'an<sup>1,2</sup> Wang Yunqiang<sup>3</sup> Jia Xiaoxu<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

**Abstract** The construction of ecological civilization is of great importance to human being's well-being and a nation's future. The Loess Plateau, the cradle of ancient Chinese civilization, is suffering from severe soil erosion and frail eco-environment caused by the climate change and human activities. Soil water is an essential resource to the vegetation construction and ecological restoration of the Plateau. The condition and future development of soil water is vital to the ecological civilization construction on the Plateau. This paper discusses the prominent resource and environment problems in the ecological civilization construction on the Plateau, focus-

ing on the aspects of the trends in climatic change, the achievement of the “Green-for-Green” projects, and the consequent soil desiccation, etc. It analyzes the studies on soil desiccation, including its definition and characteristics, its impact on eco-environment, and the regulation measures. Based on the analyses, a proposal is made for the prospective studies of the Plateau soil desiccation, soil water resource management strategies and goals for ecological civilization. It aims to provide scientific basis for policies on the national and the Loess Plateau ecological construction.

**Keywords** the Loess Plateau, climate change, ecological civilization construction, soil desiccation, soil water management

**邵明安** 中科院地理科学与资源所研究员, 博士, 博士生导师, 中国科学院大学岗位教授。中科院生态系统研究网络(CERN)水分中心主任, 中国农业专家咨询团成员, *Journal of Hydrologic Engineering* 副主编。主要从事土壤物理方面的科研与教学工作, 涉及的领域包括土壤-植被-大气传输体(SVATs)中水分运动、土壤水分研究的有关新理论和新方法、土壤水分植被承载力、区域土壤干燥化等方面。发表论文300余篇, 其被SCI收录160余篇, 出版专(编)著10部。获国家杰出青年科学基金, 入选中科院“百人计划”。研究成果获国家自然科学基金二等奖1项(排名第一)、国家科技进步奖二等奖2项(排名第二和第五)和多项省部级科学技术奖。E-mail: shaoma@igsnr.ac.cn

**Shao Mingan**, PhD., is a professor and researcher at Soil Physics of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS. He teaches Soil Physics and Soil Water Dynamics in the University of CAS. He also serves as the director of the Sub-Center for Water Monitoring and Research, Chinese Ecosystem Research Network(CERN), member of Consultancy Committee of China Agricultural Experts, and associate editor of *Journal of Hydrologic Engineering*. His research fields include water transfer in Soil-Vegetation-Atmosphere Transport system(SVATs), new theories and methods in soil water flow, soil water carrying capacity for vegetation, regional soil desiccation, et al. He has published more than 300 articles, of which 160 were published in SCI-indexed journals, and 10 monographs. He has won the research grant for distinguished young scientists sponsored by NSFC and Hundred Talents Program sponsored by CAS. His research has won the Second Prize of National Natural Science Award 2013(1 project, ranked No. 1), the National Awards of Progress of Science and Technology (2 projects, ranked No. 2 and No. 5) and multiple provincial and ministry-level science and technology awards. E-mail: shaoma@igsnr.ac.cn