

Study Advances of Soil Moisture Regime on the Loess Plateau

Lu Zhang

Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Land and Resources of China, Institute of Land Engineering & Technology, Shaanxi Land Construction Group, CO., LTD., Xi'an Shaanxi
Email: luluqiaofeng@126.com

Received: Aug. 29th, 2017; accepted: Sep. 10th, 2017; published: Sep. 15th, 2017

Abstract

There is arid climate and low rainfall in Loess Plateau, where the soil moisture has obvious space-time variable characteristics, and is prone to dry layer in the dry season and the crop growing season, which affect plant growth and sustainable development of the local soil. This paper looked to solve the problem of local soil moisture imbalance, summarized the research progress of ecological conditions, space-time variability of soil moisture and soil dry layer, and proposed some control measures to improve soil moisture conditions in this area, and indicated the problem which needed to be further resolved and future research development direction.

Keywords

Soil Moisture, Space-Time Variability, Soil Dry Layer

黄土高原土壤水分状况研究进展

张露

陕西省土地工程建设集团, 陕西地建土地工程技术研究院, 国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安
Email: luluqiaofeng@126.com

收稿日期: 2017年8月29日; 录用日期: 2017年9月10日; 发布日期: 2017年9月15日

摘要

黄土高原地区气候干旱, 降雨量少, 其土壤水分具有明显的时空变异特征, 在干旱季节及作物生长旺季

土壤易出现干层,影响植物生长及当地土壤的可持续发展。本文就黄土高原土壤水分生态条件、时空变异性及土壤干层的研究进展进行综述,并提出了改善该地区土壤水分状况的调控措施,指明有待深入探讨的问题及今后研究发展的方向。

关键词

土壤水分, 时空变异, 土壤干层

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

黄土高原是世界最大的黄土沉积区,其土壤水分状况正在日益恶化,滥伐滥垦,水土流失,植被锐减,严重影响了当地的生态环境建设和人民的生活水平,所以明确黄土高原土壤水分状况及变化趋势对当地植被的恢复与生态重建意义重大。

20世纪90年代以前,许多研究者对黄土区土壤水分问题进行过大量具有开拓性和卓有成效的工作,主要涉及土壤水分影响因素(如质地、容重)、土壤水分常数(如田间持水量、凋萎湿度、饱和持水量、土壤导水率等)、土壤干层及局地植物生长与土壤水分的关系等方面,基本清楚了黄土高原局地土壤水分特征的本底状况[1][2][3][4][5]。

2. 黄土高原土壤水分生态条件

2.1. 地理信息

黄土高原(Loess Plateau)位于中国中部偏北部,为中国四大高原之一,是地球上分布最集中且面积最大的黄土区,总面积64万平方千米,横跨中国青、甘、宁、内蒙古、陕、晋、豫7省区大部或一部,主要由山西高原、陕甘晋高原、陇中高原、鄂尔多斯高原和河套平原组成。海拔高度800~3000米,黄土高原属干旱大陆性季风气候区。

黄土高原是世界上水土流失最严重和生态环境最脆弱的地区之一,地势由西北向东南倾斜,除许多石质山地外,大部分为厚层黄土覆盖,经流水长期强烈侵蚀,逐渐形成千沟万壑、地形支离破碎的特殊自然景观。地貌起伏大,山地、丘陵、平原与宽阔谷地并存,四周为山系所环绕。

2.2. 自然降水

黄土高原由于受季风的影响,雨季、旱季降水量差异明显,多年平均降水量为200~600 mm,雨季主要集中在7、8、9月份,此期降水量多达全年降水量的50%~80%,旱季则是从当年10月至翌年6月[6]。黄土高原的这种降雨特征一方面是雨热同季,有利于植物生长;另一方面则易产生春旱和水土流失等危害,对作物生长及土壤发育不利。

2.3. 大气蒸散

黄土高原地区光热资源丰富,对植物生长有利,但蒸发强度大易使植物缺水。据统计该地区农田最大蒸散量每年为750~950 mm [7],明显高于多年的平均降水量,因此水分条件是黄土高原地区植物生长

与布局的主要限制因子之一。

2.4. 土壤水分性状

黄土高原土壤疏松,质地均一,持水能力较高,其土壤水分性质按质地带汇总见表1所示,黄土高原从沙壤带到重壤带,土壤水分性质呈现规律性变化。从表1可以看出,黄土高原土壤有效水含量多在12%~15%,以植物需水的主要供水层200 cm土层计算,黄土高原土壤储水能力可达450~600 mm,对多年平均降水量为200~600 mm的黄土高原而言,降水可全部蓄存,一般不会发生深层渗漏问题[8]。所以,从这个角度可以认为深厚的黄土高原可看作一个潜力巨大的土壤水库,具有蓄积降水、长期保存、调节洪枯、持续供应的功能[9]。但是,黄土高原土壤疏松多孔,毛细孔隙发达,具有极强的蒸发性,水分易散失。因此李凤民等认为黄土高原土壤虽具有强大的蓄水能力,但保水能力较差,把它作为一种大容量的水库有失偏颇[10]。李开元等研究也表明降水无论在丰水年还是干旱年均不可能全部被土壤保蓄至下一年为作物所利用,而土壤只能在生育期内对有限的降水起到调节和再分配作用[11]。

从表1可以看出,田间持水量随质地变重而有所提高,但轻壤土以上变幅不大,萎蔫系数则完全随质地变重而增高;有效水含量以轻壤带最宽,其中高水势(低吸力)部分比例与质地呈负相关;土壤水分特征曲线的斜率以轻质土壤较为陡峭。所以,单独以某种指标去评价土壤水分性能,难以得到确切的答案。如:重壤土持水能力较高,但有效水含量却因萎蔫系数偏高而稍窄;轻质土壤有效水含量范围较宽或高水势有效水比例较大,但湿润后的土壤由于其高通量密度而具有较高的蒸发强度,不利于土壤保墒。良好水分性质的理想土壤,应当是入渗能力高,向地表迁移能力弱,有效水范围大,而且能把这三者结合在一起并具有良好的团粒结构的土壤[2]。

3. 黄土高原土壤水分时空变异性

土壤水分时空差异性是多重尺度上各种环境因子共同作用的结果,这些不同尺度上的因子对土壤水分时空异质性的影响表现出显著的时空变化规律,土壤水分的空间异质性是立地尺度(坡度)、坡面尺度(坡位与相对高度)和流域尺度(土地利用与降雨)等多重尺度上的环境因子共同作用的结果[12]。浅层土壤水分

Table 1. Soil water properties on the Loess Plateau

表1. 黄土高原土壤水分性质[8]

性质	紧沙带	沙壤带	轻壤带	中壤 I 带	中壤 II 带	重壤带
砂粒%(>0.05)	65~80	40~60	20~25	10~15	5~10	3~8
粉粒%(0.05~0.001)	10~25	20~50	60~70	65~75	65~75	65~75
粘粒%(<0.001)	4~6	5~10	10~15	15~18	18~25	20~28
容重/g·cm ⁻³	1.45	1.35	1.25	1.30	1.30	1.35
田间持水量/%	11~14	16~18	18~20	20~22	20~22	20~24
田持吸力/bar	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.6
萎蔫系数/%	2.5~3.0	3.0~4.0	4.0~5.0	5.0~7.0	7.0~8.0	8.0~13.0
有效水/%	8~11	13~14	14~16	14~16	13~15	12~16
<1 bar 有效水的百分比/%	>65	60~65	50~60	10~15	8~10	<8
非饱和导水率 K(θ)(cm·day ⁻¹)	$3.2 \times 10^{-4} e^{77.5\theta}$	$3.4 \times 10^{-10} e^{83\theta}$	\	$1.5 \times 10^{-9} e^{71.3\theta}$	\	$2.7 \times 10^{-8} e^{47.3\theta}$
水分特征曲线	$9.6 \times 10^{-5} \theta^{-3.5}$	$1.95 \times 10^{-3} \theta^{-2.83}$	$7.79 \times 10^{-4} \theta^{-3.68}$	$1.29 \times 10^{-3} \theta^{-3.5}$	$4.88 \times 10^{-4} \theta^{-4.12}$	$6.19 \times 10^{-4} \theta^{-4.36}$

注: θ 是体积含水量(cm³·cm⁻³)。

空间变异及其分布格局主要受地形、降水和土地利用方式及其结构等因素的影响。余冬立等研究发现,在湿润和中等湿润时段,土地利用是影响土壤水分(表层除外)变异的主要因素,干旱时段土壤水分的变异格局主要受土壤性质的影响[13]。坡向、坡度、坡位是坡面尺度土壤水分分布的重要影响因素,微地形对土壤含水量具有显著影响,阳坡各微地形土壤水分顺序为塌陷 > 切沟底 > 缓台 > 浅沟底 > 原状坡 > 陡坎[14]。黄奕龙等研究各地类在不同降水年份土壤含水量的季节变化和垂直变化均差异显著,偏涝年各地类土壤含水量季节变化呈凹型曲线(10%~17%),先减小后增大,最后趋于稳定,正常降水年各地类土壤含水量随季节变化呈W型曲线(8%~20%),总体呈下降趋势[15]。黄土高原土壤水分具有显著的区域分异和微域分异特征,其土壤水分的空间分布决定着该区植被类型及其生长状况的空间布局[16]。

3.1. 土壤水分季节变化

由于黄土高原地区土壤含水量主要靠降水补偿,所以受降水影响,土壤水分也发生着相应的季节变化。董大学等在渭北旱塬的测定表明,裸地土壤水分的季节性动态可分为四个阶段:春季干湿交替阶段、雨季蓄墒阶段、雨后水分上移蒸发阶段、冬季缓慢蒸发阶段[17]。而一般年份作物在生长期土壤水分动态可分为3个时段:春末夏初土壤水分消耗期、夏末秋初土壤水分蓄积期和秋末冬初土壤水分消耗期[18]。黄土高原沟壑区林地土壤水分年内季节动态可划分为生长初期土壤水分相对稳定期、生长中期土壤水分强烈消耗期、生长中期土壤水分恢复补偿期以及生长末期土壤水分缓慢蒸发期这4个阶段[19]。李开元等将土壤水分的季节变化分为春季缓慢蒸发、夏季蓄水增墒、秋季强烈蒸发损耗、冬季相对稳定四个阶段[11],表明黄土高原土壤水分在年内经历了低—高—低的季节变化。总之,黄土高原土壤水分的时间变化特征,在年际尺度上表现为干旱年份土地利用类型和坡向对土壤水分的影响较大;而在湿润年份,影响程度减弱[15]。

3.2. 土壤剖面水分变化

在同一地理位置,土壤水分的分布受坡度、坡向、坡位、植被类型、植被密度和生物量等影响,表现出一定的空间变异特性[20]。据李玉山研究表明,黄土高原土层一般为50~100 m,地下水埋藏较深,无上行补给的可能,因此降水成为该地区土壤水分的唯一来源,在干旱和生物利用的共同作用下,降水入渗一般不超过3 m,基本与植物根系的活动范围一致,但在林地和多年生草地,黄土高原土壤某一深度常常形成低湿层,甚至出现“土壤干层”,土壤含水量接近凋萎系数,对林草的生产力造成极大危害,由此可看出黄土高原水分循环是比较单纯的降水入渗和上行蒸发过程,同时黄土高原由于降水、蒸发和植物利用的共同作用,土壤水分在剖面上的分布也表现出了一定的层次性[9]。王孟本等将土壤剖面分为活跃层、次活跃层、相对稳定层三个层次[21];董大学等则分为活跃层(0~80 cm)、相对稳定层(80~200 cm)两个层次[17]。近年来,傅伯杰等研究了中部黄土区丘陵坡地的土壤水分空间分布状况,建立了坡地土壤水分空间分布的数学模型,认为坡地土壤水分主要受坡度和坡位的影响[22]。穆兴民探讨了黄土区旱地的土壤水资源,提出了黄土区土壤水资源的地带性与非地带性概念[23],但也有学者认为“地带”的概念多与气候、地理等稳定的自然区系概念相联系,对于黄土高原土壤水分地带的概念还有待进一步的研究证实。

黄土高原土壤水及其有效水的区域分布有着相似的规律,即北低南高,具有镶嵌结构,尤其是延安以南地区,受局部小地形、小气候的影响明显,土壤水分含量较高,表现出土壤水区域空间分布与下垫面区域状况相一致的规律,土壤质量含水量低于5.5%以北的地区,由于已接近当地土壤凋萎湿度,开始进入典型的草原地带[16]。黄土高原地下水位深达60 m以下,不参与局部SPAC水循环,所以,黄土区土壤水的垂向分布仅表现为降水或径流在土体内的入渗、再分布后所形成的土壤剖面水分分布曲线,这

种水分剖面分布结构，容易造成土壤深层储水被植物过度利用而难以得到补偿的后果[9]。

黄土高原天然草地土壤水分在垂直方向上有着相似的分布特征，大体在距地表 70 cm 以上的土层，由于受水热条件变化影响强烈，其土壤含水量随降水情况呈现出较大的波动性；而在 70 cm 以下土层，土壤含水量基本上呈现逐渐递增的趋势，因此从距地表 70 cm 土层处可将黄土高原天然草地土壤水分在垂直方向上的分布划分为 2 个层次：70 cm 以上的速变层及 70 cm 以下的积累层。关于黄土区土壤剖面水分分布特征的研究，韩仕峰(裸地)、刘增文等(人工油松林地)、李凯荣等(人工刺槐林地)、吴学栋等(沙打旺人工草地)、王孟本等(人工柠条林地)均进行过相关研究，都是从水分活动特征的角度去分析，一般将黄土高原垂直剖面按水分利用情况分为速变层、活跃层、次活跃层、相对稳定层 4 个层次[8] [21] [24] [25] [26]。

3.3. 区域土壤水分空间变异

由于黄土高原土壤水分主要靠降水补偿，因此该地区土壤水分的水平变化与其降水量的区域变化基本一致，由东南向西北逐渐减少，依次分布着森林、森林草原、典型草原和荒漠草原 4 个植被带，尽管土壤含水量在水平方向上存在着明显的区域变化，但在具体的某一区域内部由于环境小气候的影响而在垂直方向上表现出有规律的变化，一般而言，在沟谷和坡脚处的水分条件要优于沟坡、坡顶和梁峁，阴坡条件好于阳坡[27]。总之，在黄土高原地区，由于所处地理位置过渡性、气候变化剧烈性、地形复杂性等，表现出独特的水分生态条件，由此所造成的植物生产力水平也千差万别，根据土壤水分条件来进行植被建设是黄土高原生态环境得以改善和持续发展的必由之路[7]。

4. 改善黄土高原土壤水分状况的调控技术

4.1. 选择适宜的植物种类

土壤水分条件的优劣是植物生产力的重要标志，而土壤水分状况又是自然降水、大气水分、植物利用共同作用的结果，因此改善土壤水分状况需要从其自身承载力和植物水分利用效率两个方面入手，才能收到较好的效果。

目前在黄土高原形成“土壤干层”的林草种，均不是当地自然植被的建群种和优势种，这些物种虽然具有抗旱性强、速生等特点，但前期耗水量大，造成土壤水分严重亏缺。所以对不同的地方应选择适宜的树种，适宜的植物经过长期进化后与本地水分条件相适应，能达到供需平衡，同时还具有较强的抗旱能力。

4.2. 强化降水的入渗与保持

众所周知，黄土高原土层深厚，所以可以充分利用其土壤持水能力强的特点，采取有效措施，减轻水分流失，增加降雨的入渗转化量，尽可能地补偿土壤水分，改善植物生长的水分条件，同时减少地面的无效蒸发，而相对增加植物的蒸腾耗水量，来提高水分利用效率并增加植物的生产力。

4.3. 根据土壤水资源确定适宜的生物量

如果某一地方种植密度过大，生物量过高，则生物间的竞争会加剧，对其生长不利，且植物的大量耗水，将破坏土壤的水分平衡，造成土壤干燥化；但反之覆盖度较低，一是雨滴溅蚀和水土流失严重，难以发挥植被的生态效益，二是水分利用效率将降低。因此对于本就缺水的黄土高原地区，应使林草正常生长需水量与水分供应量相协调，才不至于当地水分被过度消耗，从而保证植被的持续生长。

4.4. 构建复合结构

黄土高原土壤水分含量较低，且其利用效率不高。韩仕峰等在黄土高原对各种植被下土壤水分状况

进行测定, 储水量变化见表 2, 从表 2 可以看出黄土高原土层储水潜力巨大, 植物并没有发挥出当地土壤水分利用的最大优势, 这是一种浪费[8]。因此根据不同植物用水深度和强度的不同, 及根系分布特点, 进行合理搭配或轮作, 以便充分利用各土层中的水分, 提高水分利用率, 同时还应强化林地管理, 加强幼苗的抚育管理, 如及时的平茬复壮或皆伐萌芽更新技术, 不仅能提高林木产量, 还可增加薪材, 同时又能改善当地坡面水肥条件, 促进水分更新循环与林木发育[28]。

4.5. 利用坡面径流发展径流林业

黄土高原水资源贫乏, 气候干燥, 对天然降水进行时空调控, 通过集水区或集水设备进行汇集再利用是黄土高原地区节约用水的一种有效途径。汇集的雨水以径流的形式叠加, 在造林区集存保蓄, 达到充分利用有限的降水资源去实现植被可持续发展的旱区造林模式, 促进林木生长[29]。此项技术在甘肃省应用得到了较好的效果[30], 但目前在我国大气取水技术仍处于理论实践阶段, 还有待进一步研究推广。

5. 展望

进一步研究黄土高原土壤水分时空特征可与气候变化相结合, 观测土壤水分异常变化与降水、温度突变之间的关系, 探索黄土高原土壤水分时空分布与气候变化间的相互作用[31]; 也将与土壤—植物—大气系统的研究、生态系统的研究紧密结合, 以前的植被建设和生态恢复较少考虑土壤—植物—大气连续体的水循环过程和水量平衡等问题, 黄土高原 SPAC/SVATs 水循环的研究对森林、草原植被系统的报道并不多见[32] [33]。所以, 从土壤—植被系统演变的角度去探讨黄土高原水量平衡和水环境动态的工作有待发展。

5.1. 黄土高原天然植被的土壤水分研究

黄土高原大量的人工植被建设忽略了该区域本底自然环境特征及天然植被的土壤水分时空分布特征, 造成人工林死亡, 与生态工程预期成效产生差距, 在短时间内, 人工植被建设打破了黄土高原土壤水分与植被间的平衡, 导致生态环境恶化。研究表明, 黄土高原不同地域的人工刺槐在功能性状上并没有明显差异, 没有形成适应不同地区气候条件的生态类型, 而只是通过调节自身的生长速度, 甚至牺牲部分构件来适应环境变化, 尤其是水分条件的变化[34]。

现有的研究大多着重于人工植被的土壤水分特征与变化, 对黄土高原天然植被在组成、结构和功能群、多样性等方面与土壤水分的相互作用及水分平衡机制的认识非常不足。国外相关研究表明, 土壤水分梯度是影响植物种类组成的首要因素, 而功能群主导着一定范围内的土壤水分梯度[35]。一个植物群落

Table 2. Change of soil effective water reserves under different vegetation type changes of soil

表 2. 不同植被类型条件下土壤有效水储量的变化

植被	平均土壤剩余有效水储量				按最大吸湿水计算土壤剩余有效水储量/mm	
	0~2 m 土层		0~5 m 土层		0~2 m	0~5 m
	储水量/mm	占干重/%	储水量/mm	占干重/%	土层储水量	土层储水量
农地	156.12	6.00	463.16	7.12	/	/
乔木林地	78.14	3.01	200.92	3.09	135.60	344.57
灌木林地	20.58	0.30	89.38	1.39	75.71	227.20
人工草地	40.05	1.55	137.60	2.13	93.11	270.25
自然草地	62.88	2.47	199.22	3.13	/	/

的组成在很大程度上取决于土壤水分的数量和空间分布[36]。有研究通过实验发现植物群落对土壤水分的影响,土壤水分与群落根长呈负相关,与树冠高度呈正相关[37]。土壤水分变化不仅直接影响着荒漠植物的多样性,且通过影响其它生境因子又间接地影响着植物多样性的维持,而生态系统主要“构件”物种的多样性对水分变化的响应直接影响生态系统的功能和稳定[38]。因此,对天然植被组成、结构、功能群及多样性对土壤水分的直接和间接反馈的研究,如物种在种群水平上如何适应土壤水分的降低、植物多样性在物种丰富度和多度上对土壤水分变化的响应等,这些研究对黄土高原生态恢复工程的成功具有重要意义。

5.2. 土壤水分与生态系统关系的研究

黄土高原主要生态系统类型有天然和人工的森林、草地、农田、城市等,而土壤水分是这些生态系统保持平衡的重要因子。现有研究对黄土高原生态系统结构变化对土壤水分分布的影响少有涉及,对各生态系统内土壤水分差异的研究不多,较多的研究工作侧重于植物个体与土壤水分的关系;从个体扩展到群落、生态系统尺度上去研究植物与土壤水分关系的成果较少,现有研究多从小尺度研究单元,通过实验进行归纳推理,从具体的结果中概括出植被个体或种群的土壤水分动态变化的一般性原则;从较大尺度研究单元,通过观测性、相关分析、演绎推理的方法,从一般假设预测具体事件结果的研究少有报道。

大尺度研究的困难在于观测实验的数据可获取性、重复性和连续性等方面,依据研究对象的特点和研究手段的有效性,选取适宜的研究尺度或尺度域进行尺度分析是解决尺度问题的基础和起点,在多尺度研究和尺度效应分析的基础上进行尺度转换,是对研究对象进行充分理解和准确预测的关键所在[39]。

5.3. 生态交错带土壤水分变化研究

生态交错带是由不同的生态系统类型重叠而产生的,生态系统间存在活跃的相互作用,植被的时空变化比相邻区域更加迅速,具有与邻近任一生态系统都不同质的特性[40]。由于人类活动的影响,生态交错带正在逐步消失,且相关生态系统出现退化趋势[41]。生态交错带、退化森林、草地生态系统边缘区域的土壤水分动态变化及其与植被相互作用的研究,对退化生态系统恢复具有重要意义。

生态交错带具有敏感的时空动态性,其区域内土壤水分的时空变化及植物种类、群落的组成及分布变化,都具有重要的指示性。研究生态系统过渡带的土壤水分变化情况对于揭示森林或草地退化原因,及恢复退化生态系统功能具有重要参考价值。

5.4. 黄土高原生态水文模型的建立与完善

生态与水文相互作用过程的数学模拟与专门模型研制日益成为重要的发展领域,同时,生态水文学的研究注重尺度效应,把在一定尺度上获得的水文与生态原理或模型向其它不同尺度转换已成为最具挑战性的问题[42]。目前对黄土高原土壤水分与人工植被间的相互作用研究较多,但各研究间的相关性分析很少,导致研究成果较为分散,因此应增强诸多研究之间的对比性和区域代表性,对区域生态水文过程进行定量描述并建立分布式模型[33]。

目前,对黄土高原生态水文模拟及模型建立的研究,在尺度上主要以小流域生态水文过程的模拟和国外生态水文模型的应用为主,并应用SCS、SHAW、VIP、SWAP等模型对小流域内生态水文过程中径流过程、土壤水分及蒸发的动态特征、水量平衡的时空分布、人工植被水分能量动态变化等进行模拟,但大部分研究以应用国外生态水文模型,评价模型是否适合黄土高原为主,并未有真正适合黄土高原生态环境、水文特征的生态水文模型发布[43]。进一步认识植被—水文之间相互作用的复杂机理,引入

GIS\RS 技术, 逐步建立适合黄土高原生态环境与水循环特征的生态水文模型, 是定量评估黄土高原环境变化下流域生态水文响应的重要手段。

基金项目

陕西省土地工程建设集团科研项目“毛乌素地区砒砂岩与风沙土混合介质水分特性及其运移规律研究进展”(DJNY2017-23)。

参考文献 (References)

- [1] 韩仕峰, 黄旭. 黄土高原土壤水分利用和生态环境的关系[J]. 生态学杂志, 1993, 12(1): 25-28.
- [2] 李玉山. 黄土高原土壤水分性质及其分区[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1985(2): 1-17.
- [3] 邵明安. 黄土区土壤有效水动力学[J]. 科学通报, 1987, 18: 1421-1424.
- [4] 杨文治. 黄土高原的土壤水资源和造林问题[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 433-438.
- [5] 张娜, 梁一民. 黄土丘陵区天然草地地下/地上生物量的研究[J]. 草业学报, 2002, 11(2): 72-78.
- [6] 中国科学院黄土高原综合考察队. 黄土高原地区综合治理开发简要报告集[M]. 北京: 中国经济出版社, 1992.
- [7] 张雷明, 上官周平. 黄土高原土壤水分与植被生产力的关系[J]. 干旱区研究, 2002, 19(4): 59-63.
- [8] 韩仕峰. 宁南山区苜蓿地土壤水分利用特征[J]. 草地科学, 1990, 7(5): 47-52.
- [9] 李玉山. 黄土高原土壤水循环特征及其对陆地水循环的影响[J]. 生态学报, 1983(3): 91-101.
- [10] 李凤民, 赵松岭, 段舜山, 等. 黄土高原半干旱区春小麦农田有限灌溉对策初探[J]. 应用生态学报, 1995, 6(3): 259-264.
- [11] 李开元, 韩仕峰, 曹雄飞, 等. 陕北黄土丘陵沟壑区旱地土壤水分动态[J]. 水土保持通报, 1990, 10(6): 21-25.
- [12] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 715-720.
- [13] 余冬立, 邵明安, 俞双恩. 黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 57-63.
- [14] 赵荟, 朱清科, 秦伟, 等. 黄土高原干旱阳坡微地形土壤水分特征研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3): 64-68.
- [15] 郑芳, 张建军. 晋西黄土残塬沟壑区土壤水分的时空变化研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 226-230.
- [16] 胡良军, 邵明安, 杨文治. 黄土高原土壤水分的空间分异及其与林草布局的关系[J]. 草业科学, 2004, 13(6): 14-20.
- [17] 董大学, 郭民航, 李玉山. 渭北旱塬农田水分状况与提高小麦水分利用途径的研究[J]. 水土保持通报, 1990, 10(6): 13-20.
- [18] 李洪建, 王孟本, 柴宝峰. 黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4): 515-519.
- [19] 易亮. 黄土高原沟壑区生态经济型防护林土壤水分养分特征与空间配置研究[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [20] 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 6-9.
- [21] 王孟本, 李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[J]. 生态学报, 1995, 15(2): 178-184.
- [22] 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[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(3): 185-191.
- [23] 穆兴民. 黄土旱地土壤水资源的地带性和非地带性[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 237-244.
- [24] 刘增文, 王佑民. 人工油松林蒸腾耗水及林地水分动态特征的研究[J]. 水土保持通报, 1990, 10(6): 78-84.
- [25] 李凯荣, 王佑民. 黄土塬区刺槐林地水分条件与生产力研究[J]. 水土保持通报, 1990, 10(6): 58-60.
- [26] 吴学栋, 董俊, 乔小林. 陇中半干旱丘陵区沙打旺土壤水分动态特征及净初级生产力研究[J]. 水土保持通报, 1990, 10(6): 119-123.
- [27] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设和持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [28] 刘增文, 余清珠, 王进鑫. 黄土高原残塬沟壑区坡地刺槐不同皆伐更新幼林地土壤水分动态[J]. 生态学报, 1997, 17(3): 234-238.

- [29] 姜会仁. 空中取水, 新法频现[J]. 发明与创新(中学时代), 2010(7): 41.
- [30] 尹柞栋. 径流林业——旱塬曙光[J]. 青海农林科技, 1994(4): 33-34.
- [31] Seneviratne, S.I., Corti, T., Davin, E.L., *et al.* (2010) Investigating Soil Moisture—Climate Interactions in a Changing Climate: A Review. *Earth- Science Reviews*, **99**, 125-161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>
- [32] 段争虎. 土壤水研究在流域生态——水文过程中的作用, 现状与方向[J]. 地球科学进展, 2008, 23(7): 682-684.
- [33] 李新荣, 张志山, 王新平, 等. 干旱区土壤 - 植被系统恢复的生态水文学研究进展[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 845-852.
- [34] 刘江华. 黄土高原刺槐人工林生长特征及其天然化程度评价[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2008.
- [35] Tziaila, C.E., Veresoglou, D.S., Papakosta, D., *et al.* (2006) Changes in Soil Characteristics and Plant Species Composition along a Moisture Gradient in a Mediterranean Pasture. *Journal of Environmental Management*, **80**, 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.08.017>
- [36] Breshears, D.D. and Barnes, F.J. (1999) Interrelationships between Plant Functional Types and Soil Moisture Heterogeneity for Semiarid Land-Scapes within the Grassland/Forest Continuum: A Unified Conceptual Model. *Landscape Ecology*, **14**, 465-478. <https://doi.org/10.1023/A:1008040327508>
- [37] Gross, N., Robson, T., Lavorel, S., *et al.* (2008) Plant Response Traits Mediate the Effects of Subalpine Grasslands on Soil Moisture. *New Phytologist*, **180**, 652-662. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02577.x>
- [38] 李新荣, 何明珠, 贾荣亮. 黑河中下游荒漠区植物多样性分布对土壤水分变化的响应[J]. 地球科学进展, 2008, 23(7): 685-691.
- [39] 傅伯杰, 徐延达, 吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法[J]. 地球科学进展, 2010, 25(7): 673-681.
- [40] 奥德姆, 巴雷特, 著. 生态学基础[M]. 陆健健, 王伟, 等, 译. 北京: 高等教育出版社, 2009: 21.
- [41] 朱芬萌, 安树青, 关保华, 等. 生态交错带及其研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3032-3042.
- [42] 王根绪, 钱翰, 程国栋. 生态水文科学研究的现状与展望[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 314-323.
- [43] Chen, J.M., Chen, X.Y., Ju, W.M., *et al.* (2005) Distributed Hydrological Model for Mapping Evapotranspiration Using Remote Sensing Inputs. *Journal of Hydrology*, **305**, 15-39. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.029>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5507, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjas@hanspub.org