

黄土区土壤干化研究进展

王 力^{1,2}, 邵明安^{1,3}, 王全九^{1,4}, 贾志宽², 李 军^{1,2}

(1. 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, 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学农学院, 杨陵 712100; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 西安理工大学, 西安 710048)

摘 要: 全面回顾了国内对土壤干化研究所取得的成果, 包括土壤干化的分布及在不同尺度上的分异特征、土壤干层类型、土壤干化的形成原因及其危害、量化指标、防治对策等。同时对这些研究成果作了简单的对比分析, 指出了目前研究所面临的问题和不足, 并指明今后该领域的研究应结合当前退耕还林还草的总体目标, 探索土壤干化的形成机理, 提出统一的量化指标, 为黄土区退耕还林还草的生态恢复与重建工程提供参考。

关键词: 黄土区; 土壤干化; 土壤干层; 指标; 退耕还林

中图分类号: S152.7; S157

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)05-0027-05

0 引言

土壤干化现象于上世纪 60 年代中期在陕西东部旱塬区的薄城、澄城一带发现以来^[1,2], 已经发展成为黄土高原生态环境建设中的重要科学问题, 大范围长时间的持续土壤干化不仅对黄土区退耕还林工程的实施带来严重隐患, 对该区的整体水文状况产生了不良影响。由于最初其危害尚不严重, 没有引起足够的重视, 也没有学者对其进行深入全面的研究。到 20 世纪 80 年代末和 90 年代初, 黄土区人工林草植被大面积衰退, 深层土壤水分出现强烈的干燥化^[3], 严重地制约了植被的可持续发展; 农田土壤干燥化则导致了作物产量的波动性变化和耕地质量的下降^[4]。土壤干化的直接后果是形成土壤干层, 导致土壤水分生态条件恶化, 并带来一系列其它环境问题, 如小气候环境趋于旱化、土地退化、植被生长衰退等。基于土壤干化现象的危害日益严重, 从 20 世纪 90 年代中期开始, 越来越多的学者关注并着手研究这一问题^[5-15]。到目前为止, 有关该问题研究取得了一定的进展, 但总的来说还处于尚不深入的阶段。本文旨在简要介绍目前已取得的研究成果, 并将这些成果作简单的比较和评价, 以便为今后该问题的研究提供参考, 使土壤干化研究走向成熟和系统化的阶段, 为黄土高原退耕还林还草的实施提供科学依据。

1 黄土区土壤干化的现状

1.1 土壤干层的涵义

土壤干层, 一般认为是指在林草植被强烈耗水情况下, 土壤含水量处于深层次亏缺状态, 甚至有时达到或接近凋萎湿度, 这种水分亏缺经过雨季之后可得到部分补偿, 得不到补偿则该土层土壤湿度长期处于一种较稳

定的低水平状况, 这一土层称为土壤干层^[16]。但有研究表明, 土壤干化层不仅存在于林草植被下, 而且是高产农田产量产生波动性的直接原因^[4]。此外, 气候因素也是干化层形成的重要原因。杨文治等^[5]认为土壤干层系指土壤水通过物理蒸发和植被蒸腾作用, 不断地逸入大气之中, 经过较长的时间序列, 因土壤水分的负补偿效应在土体内所形成的厚度不等的低湿度层, 其下限为凋萎湿度, 上限为土壤稳定湿度(或毛管联系破裂湿度)。该定义指明了土壤干层的形成原因和湿度范围, 是目前对土壤干层较为恰当的表述。但有关干层的湿度范畴的描述尚存在一定的争议^[17]。

1.2 土壤干层的类型

土壤干层的类型有各种不同的划分方法, 但都是针对黄土区土壤干化情况进行分类的。

李玉山等根据有无植物作用将土壤干层分为利用型干层和地区型干层^[2], 认为前者主要处于半湿润区, 由不同的土地利用方式所致, 在改变利用方式后, 干层的土壤水分有可能恢复, 恢复过程由该地区降水和蒸发蒸腾平衡情况决定; 后者主要处于半干旱区, 由降水不足和作物需水负平衡造成, 一旦形成即为永久性存在, 不会因土地利用方式的改变而消失。杨文治等认为黄土区的土壤干层有两种类型^[5]: 一种为蒸散型干层, 是由植物根系强烈耗水, 土壤水分大量蒸散丢失形成的, 主要存在于黄土高原半干旱和半湿润地区, 一般认为在延长-延安-子午岭西北缘线(相当于 550 mm 降水等值线)以南地区; 另一种为蒸发型干层, 是在气候干旱与水势梯度双重作用下, 通过土壤水分强烈蒸发丢失形成的, 主要存在于黄土高原半干旱地区, 即在延长-延安-子午岭西北缘线以北地区。

根据以上两种不同的分类, 可以认为土壤干化是气候胁迫和植被强烈耗水作用下形成的。气候干旱主要由黄土区特殊的半干旱大陆性气候决定, 是自然因素, 人为无法控制, 因此把由气候干旱, 降雨量较低引起的干化称为常态干化。植被强烈耗水是由植被类型决定的, 黄土高原各区域间降雨量差异明显, 有的在 600 mm 以上, 有的不足 300 mm, 但在植被建设过程中却忽视了这一差异, 在适合低耗水性植物生长的地区种植强耗水

收稿日期: 2003-11-28 修订日期: 2004-06-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“退化生态系统重建模型与模拟(G2000018605)”; 陕西省自然科学基金项目“退耕还林条件下的土壤干化问题”; 中科院“百人计划”项目“黄土坡面人工林草系统中水分、养分运移动力学模拟”和国家自然科学基金项目“黄土高原人工林草地水分生产力模拟研究(40371077)”

作者简介: 王 力(1973-), 男, 山西临县人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤水分和植被生长方面的研究。陕西杨凌 中科院水土保持研究所国家重点实验室, 712100。Email: wangli5208@sina.com

性植物,或采用高密度粗放经营的不合理种植方式,结果导致土壤水分生态条件恶化,形成了干化层。将这类由人为因素造成的干化,称为加速干化。

黄土区土层深厚,质地均一,剖面土壤水分变化受气象条件的影响明显,同时其层间分配深度因植被条件的不同有很大差异。浅层土壤常常由于大气连续干旱和植被强烈耗水,水分含量会降低到很低的水平,有时甚至处于凋萎湿度以下,但浅层水分亏缺经过雨季易得到补充,因此这种水分亏缺是暂时性的,形成的干层不会保持很长时间,称其为临时性干层。而深层土壤水分受大气因子影响小,水分亏缺主要是因为植物强烈耗水引起的,由于黄土区降水入渗深度一般在 200 cm 以内,且没有深层渗漏,因此干层一旦形成,往往经过若干年也很难恢复,故称之为持续性干层或永久性干层^[18]。

1.3 土壤干化的分布和分异特征

关于土壤干化的分布范围目前仍是一个有争议的问题。早在 1893 年,俄国土壤水文学家指出在草原环境下人工林地存在“干燥死层”^[19];后来德国学者发现,中欧的棕色森林土壤因植被对水分的强烈消耗而出现较严重的干燥化^[20]。我国最初在黄土高原发现了干化层,不少学者认为其是黄土高原特有的水文现象^[5,16]。根据调查,在黄土高原范围内,土壤干化从 20 世纪 60 年代发现至今已呈普遍分布状态,涉及多种树草种和各类农作物。杨维西等^[6]认为土壤干化并非黄土高原特有,而在我国北方地区广泛分布,如冀北高原土壤 0~200 cm 土体最大有效贮水量只有 115.65 mm,形成了严重的干化状态^[21]。总的状况是,目前对土壤干化的研究主要集中于黄土高原范围内,取得的成果也相对较丰富。

对土壤干化的分异特征,学者们从不同尺度上进行了探索。在大尺度上,黄土区土壤水分含量受气候、土壤、植被、地形及时间等因素的强烈影响,如受土壤质地的制约和影响,土壤水分物理性能呈现出有规律的方向性变化,即从东南向西北,持水性能渐次降低,蒸发性能渐趋增加,稳定湿度逐渐降低,深层储水渐次减弱。因此,土壤干化程度与上述因素密切相关,即从东南到西北,气候渐趋干旱,降水逐渐减少,土壤干化程度也随之渐趋严重^[5,22]。在中尺度上,王力等研究了陕北黄土区土壤干化的分异特征,并据干化程度将其分为四个类型区^[17]。同时,土壤干化程度受海拔高度、降雨入渗能力的影响,在小范围的山地呈现明显的垂直分异规律,一般来说,海拔愈高,干化程度愈严重。此外,由于黄土高原水土流失严重,地形被切割的支离破碎,沟壑纵横(沟长 250 m 的沟壑密度高达 2.5~4.3 km²·km⁻²),坡地多(坡度 5 的坡地占 80%),土地类型复杂多样,土壤水分状况局地差异明显,因而土壤干化程度也有明显差异,即存在局地空间上的分异,在黄土区的各种土地类型中,梁峁地的土壤干化程度最为严重,是黄土高原生态环境治理和恢复的重点。在小尺度上,黄明斌等研究了一个小流域内不同土地利用方式下的干化分异状况,结果发现土壤的干燥化程度林地大于果园,果园大

于草地,农地最小^[23]。

1.4 产生土壤干化的植物种类

土壤干层是由于降水不能满足植被需求,植被为维持生长而强烈消耗土壤贮水造成的,所以当降水量一定时,起决定作用的便是树草种。黄土区不管是天然林还是人工林都有不同程度的干化现象存在,一般认为天然林地的土壤干化程度轻于人工林地。形成干化现象的天然植物种类主要有辽东栎 (*Quercus liaotungensis*)、山杨 (*Populus davidiana*)、桦树 (*Betula platyphylla*)、山桃 (*Prunus davidiana*)、山杏 (*Prunus ameniaca* var. *ansu*)、山楂 (*Crataegus pinnatifida* Bunge)、陇东海棠 (*Malus kansuensis*)、白榆 (*Ulmus pumila*)、中华绣线菊 (*Spiraea chinensis* Maxim)、陕西荚蒾 (*Viburnum schensianum*)、葱皮忍冬 (*Lonicera ferdinandii* Franch)、杭子梢 (*Camptolopis macrocarpa*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、黄刺玫 (*Rosa xanthina* Lindl)、茶条槭 (*Acer ginnala*)、杠柳 (*Periplocacalophylla*)、狼牙刺 (*Sophora viciifolia* Hance)、酸枣 (*Ziziphus jujuba* Mill var. *Spinosa*)、水桐子 (*Cotoneaster multiflorus* Bunge)、长芒草 (*Stipa bungeana*)、白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*)、铁杆蒿 (*Artemisia gmelini*) 等。人工树草种主要有刺槐 (*Robinia pseudacacia*)、小叶杨 (*Populus simonii*) (包括其它几种杨树)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、苹果 (*Malus pumila*)、梨 (*Pyrus* spp.)、柠条 (*Caragana korshinskii*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides* L)、紫穗槐 (*Amorpha fruticosa*)、沙柳 (*Salix psammophylla*)、白沙蒿 (*Artemisia sphaerocephala*)、黑沙蒿 (*Artemisia ordosica*)、沙打旺 (*Astragalus adsurgens* Pall)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)、红豆草 (*Onobrychis viciifolia* Scop.)、草木樨 (*Medicago alba*) 等,几乎涉及了黄土高原全部的人工造林种草种类,其中面积大的有刺槐、小叶杨、沙打旺、苜蓿等^[23-27]。农作物主要包括玉米 (*Zea mays*)、小麦 (*Triticum aestivum*)、谷子 (*Setaria italica*)、向日葵 (*Helianthus annuus*) 等。

2 土壤干化的成因和危害

杨维西等从植被利用角度总结了造成土壤干化的原因,包括植被类型选择失当、未能适当控制群落生产力以及群落密度过大等^[6],一方面主要是指在适合灌木生长的地区种植乔木,在适合低耗水性树草种的地区栽种强耗水性树草种;另一方面出于经济效益的考虑或为了追求过高的生产力,进行高密度栽植,结果在黄土高原干旱少雨,天然降水补充不足的情况下,土壤内部的水分被强烈吸收,并延伸到很深的部位,在连续干旱的条件下,被吸收的水分得不到补偿,最终导致土壤干化,形成土壤干层。王力等认为除了以上因素外,黄土区的土壤干化成因还应包括气候干旱、降水稀少及严重的水土流失等^[24]。黄土中的水分状况受大陆性半干旱气候特征的影响,各地降水偏少,多数地区年均降水量变化

在 300~650 mm 之间,而蒸发量却相对很高,变化范围在 623.8 mm (青海门源)~1254.0 mm (宁夏同心)之间^[28],最低值接近于年均降水量的最高值。这种“低降水高蒸发”的环境对土壤的干化具有明显的影响,表现在黄土高原内部从东南到西北土壤干化的严重程度与黄土高原气候干旱程度的方向性变化一致。同时,因严重的水土流失每年从黄土高原输入黄河的泥沙平均多达 16 亿 t,输送这些泥沙的洪水径流达 34 亿 m³^[29],即意味着有如此多的水资源从黄土高原流失,这无疑会加剧该地区水资源的短缺,使干旱问题趋于严重。因此,严重的水土流失对土壤干化的潜在影响是巨大的。

土壤干化的直接后果是形成干化层,其危害主要表现为:土壤显著退化、植物生长速率明显减慢、植被生长周期缩短、群落衰败以至大片死亡^[6]、天然下种更新不良、衰败后的林草地再造林难度更大及局部小气候环境趋于旱化等^[16,24]。

3 土壤干化的量化指标

近 50 余年来,不少专家和学者提到土壤干化现象,但大都属于定性的论述,如土壤干化的类型、危害等,而对土壤干层的量化指标一直没有形成统一的认识。究竟土壤含水率具体达到怎样的指标就形成土壤干层,干层的干化程度如何判别等这些定量问题的报导相对较少,而阐明这些问题对深入系统研究土壤干层具有重要意义。

杨文治等根据黄土区不同类型区的调查结果,认为干层的湿度范围介于凋萎湿度和土壤稳定湿度之间,但没有对干化程度进行划分^[5]。王力等研究了延安试区的土壤水分状况后,依据水分动态规律和土壤持水能力,以田间稳定持水量和凋萎湿度作为考虑参数,初步认为其量化指标上限应以田间稳定持水量为宜,将该值以下的水分亏缺全部看作土壤干层的范畴,其下限可达死亡湿度(植物不能再吸收的水分)。以延安试区为例,根据水分亏缺程度对植被生长的影响状况,将干层初步划分为三个等级:Ⅰ轻度干层,含水率为 9%~12% (质量含水率,下同),对植物生长影响不大,基本能正常生长;Ⅱ中度干层,含水率为 6%~9%,对植物生长影响较严重,表现为密度大的林分不成材,形成低产林;Ⅲ严重干层,含水率在 6% 以下,最低可达死亡湿度,对植物生长影响非常严重,植被经常处于缺水状态,部分已开始枯萎甚至死亡^[18]。

但该指标却不适应于有天然次生林分布的富县等地,对比研究富县天然林(顶极群落为辽东栎)与人工林(刺槐)的土壤水分状况后,提出了“林地土壤稳定持水量”的概念,作为天然林地和人工林地的土壤水分亏缺状况的依据和土壤干化的量化指标,富县这一值为 10%,研究认为土壤含水率低于 10%,即视为形成干化层。该研究以富县的顶极群落辽东栎林地土壤含水量为参照对象,在富县范围内是可行的,但由于黄土高原范围较广,从南到北分别处于不同的植被类型带上,因此

该方法能否应用于整个黄土高原地区,尚待进一步的深入研究。需要说明的是,以当地的顶极群落为研究对象探索土壤干化量化指标的思路值得借鉴和深入。

总的来说,目前对土壤干化的判别和量化指标的研究既不多见,又不够深入,现有的研究结论有一定的随意性和区域性,并不能完全适用于整个黄土高原地区,因此,亟需加强该方面的研究。

4 影响土壤干化的因素

人类对土地的不同利用方式,改变了下垫面的性质,从而影响了水文的行为模式,结果使不同土地类型下的土壤水分状况发生了变化。土壤干化是水分亏损的结果,实质上属于土壤水分的范畴,因此,影响土壤水分储贮和利用的因素对土壤干化都有影响,主要表现在以下几方面:(1)某些气候因素的变化,其中影响较明显的有温度和降雨量。降雨量的高低对土壤干化有直接的影响,一般来说雨量愈充沛,干化程度愈轻,如富县土壤干化程度比米脂轻微的多。温度的影响主要表现为对土壤水分的蒸发和蒸腾上,降雨在小区域范围内就数量而言相差不大,其影响主要通过地形条件的不同引起降雨的再分配来影响土壤水分变化,例如在沟道土壤水分条件就优于沟坡^[30]。(2)植物种类亦是影响土壤水分变化的重要因素^[31-33]。不同的植物具有不同的生物学特性、不同的耗水方式和耗水性能,因此会导致同一条件下土壤水分发生明显的变异。例如,在不适宜种植强耗水性植物的陕北黄土高原森林草原区种植耗水能力强的刺槐和小叶杨,就容易导致土壤水分产生严重的亏缺,形成土壤干化层。(3)不同的整地方式会导致小地形发生改变从而改变土壤水分状况。例如,梯田作为黄土高原水土流失治理中广泛采用的一项主要工程措施,主要是通过降低地面坡度,改变小地形,达到蓄积雨水,增加入渗,提高土壤的水分储量和利用效率,进而达到提高植物生产力的目的。在一般情况下,梯田的水分状况要比坡耕地优越的多,形成的干化层也相对轻微^[34]。(4)坡度和坡向对土壤干化有明显的影响^[35,36]。一般地,陡坡土壤水分亏缺比缓坡严重;阳坡人工刺槐林下水分整体不足,形成了远比阴坡严重的干层,这是因为阳坡吸收太阳辐射多,蒸发量更强的缘故。

5 减缓土壤干化的措施

鉴于土壤干化危害的严重性,不少学者对其防治措施进行了研究。杨维西^[6]认为植被建设应因地制宜,降低群落密度,调控群落生产力,并根据水量平衡原则提出了具体的方法:在年降水量小于 200 mm 的地区,植被建设的任务主要是保护现有天然植被,同时在一些丰水年或一般年份的雨季,可在人工措施辅助下促进植被的恢复,在无外来水源的条件下既不宜营造乔木林,也不宜营造大片灌木林;在年降水 200~300 mm 的地区,植被建设应以营造耐旱灌木或低矮灌木及早生草本植物群落为主,在无外来水源条件下不宜营造乔木林;在 300~400 mm 的地区,只宜营造旱生-中生灌木群落,

如无人工灌溉条件,即使在背阴坡也不宜大面积营造人工乔木林;在 400~500 mm 的地区,应以防护林为主,由于受总降水量的制约,即使在人工集水措施辅助下,也只能形成较稀疏的乔木林分,因而不宜大面积营造乔木林。总的指导思想应是追求群落的持续稳定和生态效益,而不宜强调其经济效益。王克勤等^[37]认为集水造林能增加植树带径流收获量,提高土壤含水量,使更多的降水渗入到根际区以下的深层土壤,防止土壤水分长时间持续亏缺和土壤干化的发生。同时,集水造林比原来的常规造林使人工乔木林植被能扩展到更大的分布范围,在 400~500 mm 降水地区不仅可形成良好结构和功能的防护林,而且也能生产一定量的木材,不至于引起土壤干化。侯庆春等^[38]认为乡土树种是生存环境长期选择的结果,具有很强的适应性,能够很好地进行自我更新或者接纳其它树种,进行自我繁衍。因此,从生态学与群落学特征考虑,选择乡土树种进行植被建设可有效地减缓土壤干化的产生。程积民等^[39]研究认为通过水平阶、水平沟和鱼鳞坑等整地措施调控,人工山桃灌木林地 0~100 cm 土壤含水量分别比荒山未整地栽植提高 0.7%~6.3%;100~300 cm 提高 0.6%~4.6%;300~500 cm 提高 1.4%~4.6%,表明采用合理的整地措施造林,可有效地减弱土壤的干化程度。

6 存在问题及展望

黄土区退耕还林(草)的生态工程面临的最重要的限制因素之一是因干旱少雨和植被强烈耗水造成的土壤水资源短缺,土壤干化形成的干层更加剧了这一趋势。土壤水资源的不足,必然会限制植被的大面积恢复,进而影响整个区域的生态环境重建和可持续发展。目前,对土壤干化的研究取得了较多的成果,但综合以上有关研究,尚存在一些不足:

1) 对土壤干化的形成原因,仅从宏观方面进行了分析和描述(如植被强烈耗水和降雨稀少),而没有从微观方面深入研究其形成机理,特别是对林草地土壤水分亏缺的研究,多数分析对降水效应只是考虑降雨量的多少和土壤内部含水率的变化,并没有深入考虑生物学问题,如林草的生理特征和生态适应性,特别是植被覆盖度的变化、植被水分消耗的动态过程、水分消耗的驱动因子以及区域水资源的可能变化,这些问题是影响黄土区土壤干化形成的重要因素,在区域生态恢复与建设中可能具有更加重要的意义。

2) 黄土区降水稀少,因此降水入渗对该区土壤水分生态条件有非常重要的影响,它是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化过程中的一个重要环节^[40]。水分的入渗、再分布、深层渗漏等过程直接影响到土壤水分的亏缺与否。从目前的研究资料来看,多数研究仅限于在某处发现了土壤干化层,以及对干化层厚度和干化程度的简单对比描述,而缺乏对土壤参与干化层形成的关系研究,有关土壤干化的水分动力学、干层恢复中的水分运动规律的系统研究更不多见,如土壤入渗能力对干化的影响、干层形成过程中水力参数(饱和及非饱和

导水率、扩散率、比水容量等)的变化以及这些变化对土壤-根系界面水分动力学性质产生的效应等。因此,有必要从土壤水动力学的角度研究土壤干化现象,为该问题的研究提供新的内容。

3) 对土壤干化的判别和量化指标的研究既不多见,又不够深入,且缺乏统一的标准,现有的研究结论有一定的随意性和区域性,仅适用于特定条件下的较小范围,不能应用于整个黄土高原地区,而阐明该问题对深入系统研究土壤干层具有重要意义。因此,亟需加强该方面的研究,提出适合于整个黄土区的干层量化指标体系。

总的来说,对土壤干化的研究处于现象的揭示阶段,机理性的分析研究尚不多见。因此,今后对该问题的研究,应拓展传统的土壤水分研究思路^[41],借助其它领域的新方法和新理论,如较成熟的农田土壤水分运动^[42,43],将土壤干化的研究转向以上几方面的探索,深入研究林草地土壤水分运动的规律^[44,45],模拟林草地土壤干化过程中的水分变化动态,揭示土壤干化的机理,阐明土壤干化的形成原因,建立干层恢复中的水分运动模型;同时,从决定土壤水分性质的因素及土壤水分动态变化和利用特征入手,考虑干层形成过程中水力参数的变化,系统研究土壤干化的判别和分级标准,提出模型支撑下的适合于整个黄土区的干层量化指标,使土壤干化的判别走向统一化的阶段,为减弱黄土区土壤水分亏缺对植被建设的影响及退化生态系统的恢复与重建提供科学依据。

[参 考 文 献]

- [1] 西北水土保持生物研究所土壤水分组 陕西东部旱塬农田墒情调查[J] 土壤, 1975, (6): 279- 285
- [2] 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[J] 生态学报, 1983, 3(2): 91- 101
- [3] 梁一民, 李代琼, 从心海, 吴旗沙打旺草地土壤水分及生产力特征的研究[J] 水土保持通报, 1990, 10(6): 113- 118
- [4] 李玉山 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J] 土壤学报, 2001, 38(3): 353- 356
- [5] 杨文治, 余存祖 黄土高原区域治理与评价[M] 北京: 科学出版社, 1992, 292- 296
- [6] 杨维西 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题[J] 林业科学, 1996, 32(1): 78- 85
- [7] 孙长忠, 黄宝龙, 陈海滨, 等 黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究[J] 北京林业大学学报, 1998, 20(3): 7- 14
- [8] 魏天兴, 朱金兆 黄土区人工林地水分供耗特点与林分生产力研究[J] 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 45- 51
- [9] 王 力, 邵明安, 侯庆春 延安地区的土壤干层现状[J] 水土保持通报, 2000, 20(3): 35- 37
- [10] 李裕元, 邵明安 黄土高原气候变迁、植被演替与土壤干层的形成[J] 干旱区资源与环境, 2001, 15(1): 72- 77
- [11] 黄明斌, 党廷辉, 李玉山 黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响[J] 农业工程学报, 2002, 18(6): 50- 54
- [12] 付明胜, 钱卫东, 牛 萍, 等 连续干旱对土壤干层深度及

- 植物生存的影响[J]. 干旱区研究, 2002, 19(2): 71- 74
- [13] 王克勤, 王斌瑞. 黄土高原刺槐林间伐改造研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(1): 11- 15
- [14] 王志强, 刘宝元, 路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1944- 1950
- [15] 穆兴民, 徐学选, 王文龙, 等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 210- 217.
- [16] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕峰. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探[J]. 中国水土保持, 1999, (5): 11- 14
- [17] 王力. 陕北黄土高原土壤水分亏缺状况与林木生长关系[D]. 杨凌: 中国科学院水利部水土保持研究所, 2002
- [18] 王力, 邵明安, 侯庆春. 土壤干层量化指标初探[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 87- 90
- [19] N 304 : , 1960, 31- 67.
- [20] Walter H. Vegetation of the Earth [N]. Springer-Verlag, New York Inc 1979, 216- 217.
- [21] 张立峰, 樊秉成, 赵广生. 冀北高原土壤干旱及抗旱土壤耕作法研究[J]. 河北农业大学学报, 1995, 18(增刊): 88 - 91.
- [22] 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[J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28(4): 357- 365
- [23] 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤干层的分布特征[J]. 自然资源学报, 2003, 18(1): 30- 36
- [23] 孙长忠, 黄宝龙. 黄土高原“林分自创性”有效水分供给体系的研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 615- 621.
- [24] 王力, 邵明安, 侯庆春. 黄土高原土壤干层初步研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2001, 29(4): 34- 38
- [25] 王力, 邵明安, 侯庆春. 延安试区人工刺槐林地土壤干层状况[J]. 西北植物学报, 2001, 21(1): 101- 106
- [26] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 404- 411.
- [27] 张海, 王延平, 高鹏程, 等. 黄土高原坡地土壤干层形成机理及补水途径研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 162- 164
- [28] 中国科学院黄土高原综合考察队. 黄土高原区域环境及其演变[M]. 北京: 科学出版社, 1992, 30
- [29] 穆兴民, 陈霖巍. 黄河断流人之过[J]. 科学, 1999, (3): 49 - 50
- [30] 杨新民, 杨文治, 马玉玺. 纸坊沟流域人工刺槐林生长状况与土壤水分条件研究[J]. 水土保持研究, 1994, 1(3): 31- 36
- [31] Dobson A P, Bradshaw A D. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology [J]. Science, 1997, 277(25): 515- 522
- [32] Goodall D W, Perry R A. A rid-land ecosystem: their structure, functioning and management (Volume 1) [M]. Cambridge University Press, London, 1979
- [33] Perry R A, Goodall D W. A rid-land ecosystem: their structure, functioning and management (Volume 2) [M]. Cambridge University Press, London, 1979
- [34] 白岗栓. 陕北丘陵沟壑区不同整地方式对果树生长环境的影响[J]. 水土保持通报, 1998, 18(7): 11- 14
- [35] 傅伯杰, 杨志坚, 王仰麟, 等. 黄土丘陵坡地土壤水分空间分布数学模型[J]. 中国科学(C), 2001, 31(3): 185- 191.
- [36] 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤干层的分布特征[J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 6- 9
- [37] 王克勤, 王斌瑞. 集水造林防止人工林植被土壤干化的初步研究[J]. 林业科学, 1998, 34(4): 14- 21.
- [38] 侯庆春, 韩蕊莲, 李宏平. 关于黄土丘陵典型地区植被建设中有关问题的研究: 乡土树种在造林中的意义[J]. 水土保持研究, 2000, 7(2): 119- 123
- [39] 程积民, 万惠娥, 王静, 等. 黄土丘陵区山桃灌木林地土壤水分过耗与调控恢复[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 691 - 696
- [40] 王文焰, 张建丰. 田间土壤入渗试验装置的研究[J]. 水土保持学报, 1991, (4): 38- 44
- [41] 马履一. 国内外土壤水分研究现状[J]. 世界林业研究, 1997, (5): 26- 31.
- [42] 李保国, 龚元石, 左强. 农田土壤水的动态模型及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [43] 冯绍元, 丁跃元, 曾向辉. 温室滴灌线源土壤水分运动数值模拟[J]. 水利学报, 2001, (2): 59- 62
- [44] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment, Part I: model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34: 73- 89.
- [45] Eckhardt K, Haverkamp S, Fohrer N, et al. SWAT-G, a version of SWAT99. 2 modified for application to low mountain range catchments [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27: 641- 644

Review of research on soil desiccation in the Loess Plateau

Wang Li^{1,2}, Shao Ming'an^{3,1}, Wang Quanjiu^{1,4}, Jia Zhikuan², Li Jun^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; 2 College of Agronomy, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 3 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4 Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In this paper, the researches on soil desiccation were reviewed, including its distribution and variable characteristics, the types of dried soil layer, the causes of formation, its harm on eco-environment, measured indexes and countermeasures against it. Simultaneously, the problems were stated and the prospective tasks of this field were proposed. The mechanisms of soil desiccation formation and the suitable measured indexes for soil desiccation were put forward. And this would be very crucial to the eco-environment construction and restoration in the Loess Plateau.

Key words: Loess Plateau; soil desiccation; dried soil layer; measured index; returning farmlands to forestlands