

黄土高原植被建设对土壤干层影响研究进展

李琪, 李志萍*, 马雅静 (华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南郑州 450046)

摘要 为深入了解土壤干层研究现状, 为下一步研究土壤干层对植被生态与土壤水分的影响奠定基础, 运用文献调研法对土壤干层基本特征、影响因素与危害等方面进行总结剖析, 明确当前恢复土壤水分及修复土壤干层主要措施, 在人工植被恢复建设中, 因地制宜, 选择合理的植被配置和土地利用方式, 通过人工集流等技术措施, 有效地利用水资源, 减少土壤干层发育。并提出如何高效率恢复土壤水分, 防止土壤干层进一步发育仍是未来的研究重点。

关键词 土壤干层; 形成因素; 黄土高原; 改善措施

中图分类号 S152.7 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)06-0010-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.06.004



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress of the Influence of Vegetation Construction on Soil Dry Layer in the Loess Plateau

LI Qi, LI Zhi-ping, MA Ya-jing (College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046)

Abstract In order to deeply understand the research status of dried soil layer and lay the foundation for the next step of studying the influence of dried soil layer on vegetation ecology and soil moisture, we used the literature research method to summarize and analyze the basic characteristics, influencing factors and hazards of dried soil layer, and clarified the current main measures to restore soil moisture and repair dry soil layers. In the restoration of artificial vegetation, measures should be taken to suit local conditions, and reasonable vegetation configuration and land use methods should be selected, and technical measures such as artificial flow collection can effectively use water resources and reduce the development of dry soil layers. It was pointed out that how to efficiently restore soil moisture and prevent the further development of dry soil layers is still the focus of future research.

Key words Soil dry layer; Formation factor; The Loess Plateau; Improvement measure

土壤水分是植物生长和生存的关键因素, 直接影响着生态系统的结构、过程和功能^[1]。尤其在我国黄土高原地区, 土壤水分是植被生长最直接的来源。黄土高原地区生态环境脆弱, 水土流失严重, 为改善该地区的生态环境问题, 近年来开展了大规模退耕还林还草工程, 增加植被覆盖率^[2-3], 一方面有效增加了径流拦截效益, 增加了降雨入渗率, 提高了土壤含水量^[4-5], 有效提升了土壤保持、固碳等多种生态系统服务功能^[6]; 另一方面, 在植被建设过程中, 由于气候干旱和不合理的人工植被配置模式, 如植被选择不当、群落密度过高等, 造成土壤水分过度消耗, 导致深层土壤水分亏缺^[7-8], 形成长期稳定的干燥化土层, 即土壤干层^[9-12]。土壤干燥化是土壤水分含量亏缺到一定程度的结果, 而土壤干层是土壤干燥化的最终表现形式。土壤干层是指由于蒸发和植物蒸腾的共同作用, 土壤水分不断向大气扩散, 导致深层储水长期得不到降水入渗补给, 经过较长时间, 在某一深度以下形成一定厚度的低湿度土层^[13-14]。土壤干层的存在阻碍了土壤上下层水分的交换, 阻碍了大气、植被、土壤间的水分循环, 降低了土壤供水能力, 破坏了生态系统水平衡, 加重了土壤退化^[15-16]。另外, 土壤干层的存在导致植物出现生长缓慢、枝干弯曲、树冠分枝少等现象, 影响后续植被的生长, 典型实例为黄土高原的“小老树”^[17]。笔者依据有关资料, 针对土壤干层基本特征及形成因素, 从植被生长年限和植被类

型两方面综述了植被建设对土壤干燥化及土壤干层的影响, 总结了已有土壤干层改善方法, 以期为进一步研究土壤干层对植被生态与土壤水分的影响提供科学支持。

1 土壤干层的基本特征

最早在 1893 年, 俄国科学家 Г.Н.Высоцкий 通过研究人工林地土壤水分变化, 发现在草原环境下人工林地存在“干燥死层”现象, 国内最早是在陕西北部旱塬, 经实测发现在 3 m 以下存在着“低湿度层”^[13], 干层主要广泛分布在我国黄土高原地区^[18-19]、亚马逊东部^[20]和澳大利亚南部地区^[21]。在亚马逊盆地东部地区, 深层土壤水分过度消耗, 造成土壤干层的形成。Richards 等^[22]在澳大利亚发现桉树对土壤干燥有显著的影响, 而松树对干燥的影响很小。研究发现, 黄土高原地区土壤干层分布范围广泛^[23-24], 从东南向西北, 气候逐渐干燥, 降雨减小, 蒸发增大, 土壤持水性能逐渐降低, 土壤干燥化程度越严重, 土壤干层厚度也逐渐加深^[25-27]。侯庆春等^[25]将土层含水量长期处于较稳定的低水平状态称为土壤干层, 并将 30% 的土壤田间持水量定义为土壤干层的上限; 李玉山^[11]在研究中对黄土高原地区下伏干层进行了定义, 认为干层长期因植物蒸散导致土壤水分负平衡, 逐渐形成了干燥化土层, 该层土壤湿度介于萎蔫湿度到 75% 田间持水量之间。杨文治等^[28]研究指出, 土壤稳定持水量与土壤质地有关, 相当于田间持水量的 70%~80%。一般来说, 土壤干层具备以下 3 个特征: ①处于土层某一深度区间内; ②具有相对长期性; ③具有一定上下浮动的湿度范围, 田间稳定持水量为上限湿度, 土壤凋萎湿度为下限湿度。受到降水和蒸发影响, 土壤浅表层以及水分频繁交换的干燥土层均不属于土壤干层的范畴。根据不同的形成原因及土壤

基金项目 国家重点研发计划项目“石羊河流域地下水合理开发利用及生态功能保护研究与示范”(2017YFC0406103)。

作者简介 李琪(1996—), 女, 吉林松原人, 硕士研究生, 研究方向: 水文地质。*通信作者, 教授, 博士生导师, 从事地下水污染控制与环境影响评价方面的研究。

收稿日期 2020-08-17

剖面水分情况可将干层分为不同的类型。从形成原因来看,根据土壤水分散失途径将其划分为2种类型:一种是由于植物根系强烈耗水形成的蒸散型干层,另一种是气候干旱造成土壤水分强烈蒸发丢失形成的蒸发型干层^[28]。考虑气候、降水及植被的作用和不同的土地利用方式,可将土壤干层分为利用型干层和地区型干层^[41],前者是在不同的土地利用方式下形成的不同程度的土壤干层主要分布于半湿润地区,该地区土壤水分在得到降水补给后可能恢复;后者主要处于半干旱区,由降水和作物需水负平衡造成,一旦形成,很难得到降水补充而恢复。根据降水入渗的补充深度和干层的持久性,可分为临时性干层(0~200 cm)和永久性干层(200 cm深度以下)。永久性干层通常发生在干旱和半干旱地区,降水量少,蒸发蒸腾量大,干层厚度大,难以恢复;临时性干层主要发生在干燥季节或半湿润地区的低降水年份,该类型的干层可以通过降水等恢复^[17,29-30]。

土壤干层的量化标准常见有3种:土壤干层厚度、土壤含水量和土壤干层形成的起始深度。土壤干层厚度和起始深度共同决定了土壤干层在土壤中的下边界,同时也可依据干层的起始深度来计算水分入渗到达干层的时间,进而规划改善土壤干层需要的补水时间及用量。土壤干层厚度是指土壤剖面含水量小于田间稳定持水量的土层厚度,厚度越大,干层发育越严重。该指标被许多学者广泛使用^[17,29]。在此基础上,段建军等^[31]提出将土壤有效水饱和度作为土壤干层的判断标准,这一指标包含了土壤水分的2个常数,即土壤田间持水量和凋萎系数,这相比土壤含水量更可靠。白凯国等^[32]提出将土壤干层的加权平均有效水饱和度、剖面有效水饱和度的差异、干层厚度及干层深度4个方面作为土壤干层的综合评判标准。

2 影响土壤干层形成的因素

土壤干层的影响因素可根据空间尺度分为大、中、小3种类型。大尺度包括气象因素(降雨量、太阳辐射等)、土壤质地及植被类型等,中尺度包括地形地貌、地下水位及土地利用方式等,小尺度包括微地形、梯田等集流措施^[33-38]。

2.1 气候 黄土高原大部分地区属于干旱、半干旱地区^[39],降水稀少,主要集中在7、8月,气候干旱,“低降水、高蒸发”的干旱半干旱气候特点是这一地区土壤水分不足的主要因子。一方面由于气候干旱,气温不断升高,植物蒸腾和土壤水分蒸发速率加快,导致土壤干燥化加重;另一方面,由于干旱半干旱地区降水较少,处于土壤水分缺失的土层长期得不到补偿,促进了土壤干层的形成及进一步的扩大和增强。陈宝群等^[40]通过研究不同植被土壤水分的季节性变化和水量平衡,认为季节性干旱是土壤干层形成的直接驱动力。李裕元等^[41]研究认为,造成土壤干层出现的原因主要是气候干旱,但人为因素是加速干层形成的原因。付明胜等^[42]研究认为,由于气候变暖造成空气干燥,加快了土壤水分蒸发和植物蒸腾,造成了干层的形成和加深。气候因素有两个方面,一是原本干旱的气候,二是人为因素导致的气候干旱化。研究显示^[43-44],人类活动的增加引起了全球气候变化,造成

温度持续升高,使原本干旱的地区更加干旱。近年来,黄土高原地区年平均气温增长了1.91℃,年降水量下降了29.11 mm,气候总体出现暖干化趋势。在这种气候变化背景下,黄土高原地区干层可能在未来分布范围更广。

2.2 地势 对于同一植被类型,不同的坡度、坡向和坡位,其土壤干燥化程度和干层厚度也有所差异。

增加坡度将减少土壤剖面中相应层次的含水量,增加土壤干层的干燥化程度和厚度,往往陡坡土壤水分亏缺比缓坡严重。坡度越大,降水就地入渗率越小,径流量越大,在相同条件的蒸发蒸腾作用下,土壤含水量减少,土壤干燥化程度加重,干层厚度增加。

坡向分为阴坡和阳坡2种,不同的坡向接受太阳光照射的时间长短不同,蒸发蒸腾强度也不同。相比较下,阳坡接受太阳光照射时间更长,吸收太阳辐射热量较多,蒸发蒸腾强度更高,阳坡土壤干化程度比阴坡更为严重,干层厚度较大。

一般来说,随着坡位降低,上方来水增多,降水入渗量大,坡底土壤的平均含水量相比坡顶较高。另一方面,因风速、温度、土壤特性等因素会影响坡顶土壤水分,导致土壤水分大量蒸散,使局部干层厚度达到最大。从而使得在一个坡面上,土壤干层的干燥化程度呈现出由坡底向坡顶逐渐增加的趋势^[33-35]。

除了植被因素与降水因素外,地形地貌、土壤质地等因子均会对土壤干层产生影响^[34]。赵景波等^[45]对砂地土层和黄土层土壤含水量的研究显示,靖边县砂地土层的含水量远低于黄土层的含水量,且砂地有明显的土壤干层发育,砂土持水性能比黄土差,导致砂土层含水量低,该地区的地表沉积物主要为细砂,黏土含量很小,因此该地区的土壤持水性能差。

2.3 植被

2.3.1 植被类型。在黄土高原地区,绝大部分土壤处于半湿润半干旱状态,由于降水难以满足植被需求,人工种植植被存在土壤水分亏缺情况,形成土壤干层^[46]。黄土高原形成土壤干层的人工林草植被主要有刺槐、小叶杨(包括各种杨树)、油松、柠条、沙棘、沙打旺、苜蓿、枣树等,共同特征如下:①抗逆性强,抗旱性更强,这类植被根系吸水能力极强,可使土壤含水量低至凋萎湿度以下;②速生、生物产量高,这类植被不仅产量高,水分生产力也高;③大多为引进的外来种和人工种,不是当地自然植被的建群种和优势种,这些植被打破了原有的自然演替规律,导致植被与降水之间不平衡,导致土壤干层形成^[25,41,47]。

首先,不同植被类型生长速度不同,会导致其根系分布深度和密度不同^[48-49],又因植被生长所需的土壤水分及产生的蒸腾量差异,导致干层深度以及土壤干燥化程度的差异。通常土壤干燥化程度的高低和干层厚度的大小均表现为林地>灌木林地>果园>草地>农地、高产田>低产田、有植物地>裸露地^[11,33,50]。付明胜等^[42]根据不同植物根系分布的不同来测定土壤水分深度,结果表明在农作物、幼林地及成林地3

种不同植被下,油松林地干层最深,埋深为0~130 cm的土壤含水量接近凋萎湿度4.2%,140~160 cm的土壤含水量仅4.3%,160~180 cm的土壤含水量仅5.0%。曾辰等^[51]研究发现苜蓿地对降雨节流作用最强,土壤水分消耗最大,柠条地次之。余冬立^[52]对黄土高原水蚀风蚀交错带内水土环境效应进行研究,结果表明退化人工草地和退耕柠条林在4~6 m土壤耗水无较大差异,深层土壤水分受到退化人工草地/柠条林消耗,大面积形成水分连续性断裂,当降雨量不足,难以补给深层土壤水分时,土壤干燥化加剧。刘丙霞^[53]通过研究不同土地利用类型(柠条林地、苜蓿草地、撂荒地和农地)土壤水分在不同降水年型(丰水年、平水年、枯水年)下的土壤水分水量平衡特征,发现在不同降水年型下,柠条地、苜蓿地和撂荒地中的水分消耗深度超过4 m,撂荒地和农地深层土壤剖面始终无干层产生,而柠条地和苜蓿地土壤剖面产生严重干化。

2.3.2 植被生长年限。人工植被随着植被年限的增加,根系加深,不断消耗深层土壤水分,土壤干层厚度也在增大。研究发现,在黄土高原不同地区,对比分析不同植被类型土壤水分发现,植被生长年限越长,土壤水分含量越低^[33,54-56]。多年连续种植苜蓿会导致土壤干燥化,生长年限时间越长,干燥化越严重。如苜蓿草地生长3年之后土壤干层厚度达100~760 cm,生长15~28年后0~10 m土层内土壤湿度平均为10.20%,接近凋萎系数,土壤干层最大深度在14 m以上^[57-58]。杨文治^[59]通过研究半干旱地区柠条植被生长年限与土壤水分之间的关系,发现柠条生长前几年未形成干层,在6~14年土壤干层厚度为240~260 cm,生长14年的土壤干层厚度达700 cm。王艳萍等^[60]对黄土塬区内不同土地利用方式下的土壤水分状况进行分析,结果表明,在农田和7龄果园中不存在土壤干燥化现象,在17龄果园土壤剖面存在分布深度为320~600 cm的干燥化土层。梁海斌等^[61]对不同林龄的人工柠条林进行研究并对各样地的剖面土层进行土壤干层划定,在200~300 cm土层10年和20年柠条林地中度干层和严重干层,35年人工柠条林在200~600 cm内土壤剖面干化程度均为中度甚至严重干层,结果表明,随着人工柠条林林龄的增长,平均土壤含水量逐渐减小,土壤剖面干燥程度也逐渐加剧,土壤干层深度也加深。

2.3.3 人为因素。人为因素对干层的形成及发展具有很大的影响。一方面,在引进树种时,未考虑立地条件和树草种特性,大量引进不适宜的树种会造成原生植被和降水之间的动态平衡,易产生诸多问题。例如,干旱少雨地区由于天然降水补充不足,植被必须通过根系吸收土壤中的水分来维持正常生长,若在该地区大面积种植喜水植被,在持续干旱情况下,土壤中水分被吸收而得不到补偿,逐渐引起土壤干燥化,最终形成干层。林地种植密度不当也是产生干层的原因之一。植物群落的生产力以及其对水分的消耗量均与植被密度有关,高密度种植必然导致高水分消耗,最终造成干层。另一方面,由于黄土高原地区“低降水、高蒸发”的气候特点,在退耕还林过程中选择抗旱性强的树种,如柠条、刺槐等,这

些抗旱性的树种根系较深,对土壤水分具有较强的吸水能力,长期情况下消耗深层土壤水分,进而加剧土壤干燥化^[62]。此外,施肥和耕作方式等农业措施也会通过影响植被生长、根系吸水进而影响干层的发展^[63-65]。

3 土壤干层的改善与修复

土壤干层的发展及其干燥化程度与植被根系深度、植被类型、植被生长年限、土壤质地及地势条件等有关。总体来说,土壤干层是自然因素和人为因素双重作用的结果。土壤干层阻碍了土壤上下层水分的交换,造成现有植被水分生态条件的恶化,不仅影响当前植被,还对后续人工植被的生长产生严重影响^[17]。因此,对土壤干层进行减弱和消除,恢复深层土壤水分是必要的。

根据不同地区不同情况选择种植不同的植被类型和适宜密度^[45],在选择树种时应遵循植被的自然演替规律,适地适树,依据植被地带性分布规律、树种的生物生态学及群落学特性,选择适宜的乔、灌、草种及种植密度。例如在砂土区应以耗水量较小的耐旱草灌为主;在黄土区应种植耐旱的乔、灌、草相结合的植被;在黄土高原干旱少雨的地区,应多种植耗水少和固沙能力强的灌木树种,不应广泛种植蒸腾作用旺盛的乔木树种。在半干旱区,沙打旺草地密度以4 500株/hm²为宜,而灌木适宜密度一般为4 950~6 600株/hm²,乔木在中龄的密度以2 250株/hm²为宜^[66]。

选择合适的土地利用结构,通过增加地区植被的灌木和种草所占比例,调整并形成合理合适的土地利用结构。有研究认为,对于利用型干层,如果改变利用方式,干层可能会消失,恢复过程由该地区降水和蒸发蒸腾平衡情况决定^[13]。另外,研究发现封育措施对土壤干层的消除有积极作用,随着封育年限的增加,土壤内含水量会明显增加,且土壤干层也会逐渐减轻变薄^[67-68]。王猛等^[69]研究表明,连续封育4年后,0~10 cm土壤容重明显降低,0~10 cm土壤含水量明显增加,10~40 cm土壤有机质含量明显增加。王志强等^[70]研究发现,随着翻耕年限的增加,干层内土壤水分恢复的深度和程度会逐渐增大,当重新再种植一年生农作物之后,土壤水分不会继续恶化,甚至干层水分还会恢复。

在干旱半干旱地区水资源较为有限,采取一些技术措施,以便有效地利用水资源,减少土壤干层发育。例如通过人工集流措施^[25],在坡地上特别是坡度较大的坡地上挖鱼鳞坑,收集雨水,可把坡地改造成梯田,并把梯田的边缘抬高,增强雨水的入渗,防止和削弱土壤干层发生的作用。另外,采取灌溉、地表覆盖及其他工程水保措施可缓解土壤干燥化程度^[71]。研究表明,适度对植被增加修剪强度可明显减少植被耗水^[72-73],全年地膜覆盖更有利于生育期土壤水分储存并可有效降低林地休眠期的土壤水分损失^[74-76]。

4 结论及建议

在干旱半干旱地区,降水是主要的补给来源,但在土壤某一深度存在厚度不同的土壤干层,若降水强度较小,在入渗过程中一部分蒸散到大气中,另一部分被植被根系所吸收;若降水强度较大,在垂直入渗过程中,这些具有水分缺失

的干层会成为水分传递的隔水层,阻隔重力水下渗,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^[66]。针对土壤干燥化所产生的土壤干层问题,已有学者在土壤干层的定义类型、量化指标、形成原因及影响因素等方面取得了一些研究,然而仍有许多问题需要进一步深入研究,具体表现在以下方面:

(1) 当前对土壤干燥化及土壤干层研究多局限于黄土高原某个流域或地区,多以年为单位进行对比分析,缺乏在空间尺度上及季节动态下的探讨。

(2) 常见的干层评价指标有 3 种:干层厚度、土壤含水量和干层形成的起始深度。这 3 种指标量化简单,意义清楚,应用广泛,但目前的量化指标不够全面,应从土壤水能量方面,基于土壤水势,结合植被生理生态特征,综合确定干层判断指标。

(3) 土壤干层的发展及其干燥化程度与植被根系深度、植被类型、植被生长年限等有关。当前对植被作用下土壤干层的发育过程及不同类型人工植被土壤干燥化程度研究较多,但对土壤干燥化及土壤干层下后续植被的种植及生长状况研究较少。因此,深入开展不同植被的生态吸水研究,开展土壤干燥化状况下植被生长情况研究,有助于在干旱半干旱地区制订合理的生态工程措施,避免土壤干燥化的形成。

(4) 土壤水分在植物生长过程中起着重要作用,土壤干燥化是土壤水分亏缺的结果,土壤干层是土壤干燥化的最终表现形式,对土壤干层进行减弱和消除,恢复深层土壤水分是必要的。适地适树,合理地配置植被组成和空间布局,根据当地环境的水分承载力选择造林种草的适宜密度;在水资源较为有限的地区,采取一些技术措施,如采用人工集流措施及灌溉、地表覆盖等方式缓解土壤干燥化程度。另外,土壤干层的恢复速率较慢,因此如何高效率恢复土壤水分,防止干层进一步发育,仍是未来的研究重点。

参考文献

- [1] YANG F T, FENG Z M, WANG H M, et al. Deep soil water extraction helps to drought avoidance but shallow soil water uptake during dry season controls the inter-annual variation in tree growth in four subtropical plantations [J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2017, 234/235: 106–114.
- [2] ZHANG B Q, HE C S, BURNHAM M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China [J]. *Science of the total environment*, 2016, 539: 436–449.
- [3] CHEN Y P, WANG K B, LIN Y S, et al. Balancing green and grain trade [J]. *Nature geoscience*, 2015, 8(10): 739–741.
- [4] ZHAO G J, KONDOLF G M, MU X M, et al. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2017, 148: 126–137.
- [5] YAO H F, SHI C X, SHAO W W, et al. Changes and influencing factors of the sediment load in the Xiliugou basin of the upper Yellow River, China [J]. *Catena*, 2016, 142: 1–10.
- [6] FU B J, WANG S, LIU Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China [J]. *Annual review of earth and planetary sciences*, 2017, 45(1): 223–243.
- [7] WANG S, FU B J, GAO G Y, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2013, 101(3): 122–128.
- [8] YANG L, CHEN L D, WEI W, et al. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513(1): 314–321.
- [9] DENG L, YAN W M, ZHANG Y W, et al. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: Evidence from northern China [J]. *Forest ecology and management*, 2016, 366: 1–10.
- [10] 黄泽. 黄土高原半干旱区典型人工草地与天然草地土壤水分平衡研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [11] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究 [J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 427–432.
- [12] YANG L, WEI W, CHEN L D, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. *Journal of hydrology*, 2012, 475: 111–122.
- [13] 西北水土保持生物土壤研究所土壤水分组. 陕西省农林科学院澄城塄村蹲点组. 陕西北部旱塄农田墒情调查 [J]. *土壤*, 1975, 7(6): 279–285.
- [14] 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.
- [15] 赵明月, 赵文武, 钟莉娜. 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应: 以陕北黄土丘陵沟壑区为例 [J]. *生态学报*, 2014, 34(5): 1105–1113.
- [16] 兰志龙, 潘小莲, 赵英, 等. 黄土丘陵区不同土地利用模式对深层土壤含水量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 847–855.
- [17] 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.
- [18] 段建军. 黄土高原地区土壤干层的分布状况与时空动态研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [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 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 436–442.
- [20] JIPP P H, NEPSTAD D C, CASSEL D K, et al. Deep soil moisture storage and transpiration in forests and pastures of seasonally-dry Amazonia [J]. *Climatic change*, 1998, 39(2/3): 395–412.
- [21] ROBINSON N, HARPER R J, SMETTEM K R J. Soil water depletion by *Eucalyptus* spp. integrated into dryland agricultural systems [J]. *Plant soil*, 2006, 286: 141–151.
- [22] RICHARDS B G, PETER P, EMERSON W W. The effects of vegetation on the swelling and shrinking of soils in Australia [J]. *Géotechnique*, 1983, 33(2): 127–139.
- [23] 陈洪松, 王克林, 邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展 [J]. *林业科学*, 2005, 41(4): 155–161.
- [24] 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.
- [25] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕锋. 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.
- [26] 杨文治, 邵明安, 彭新德, 等. 黄土高原环境的早化与黄土中水分关系 [J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 1998, 28(4): 357–365.
- [27] 李玉山, 韩仕峰, 汪正华. 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(土壤水分与土壤肥力研究专集)*, 1985(2): 1–17.
- [28] 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.
- [29] WANG Y Q, SHAO M A, LIU Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2010, 159(1/2): 99–108.
- [30] ZHAO C L, JIA X X, GONGADZE K, et al. Permanent dry soil layer a critical control on soil desiccation on China's Loess Plateau [J]. *Scientific reports*, 2019, 9(1): 1–9.
- [31] 段建军, 王小利, 张彩霞, 等. 黄土高原土壤干层评定指标的改进及分级标准 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 151–154.
- [32] 白凯国, 靳红强, 郗军辉, 等. 土壤干层综合指标评判法 [J]. *甘肃科技*, 2015, 31(7): 34–35, 31.
- [33] 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.
- [34] 张晨成, 邵明安, 王云强. 黄土区坡面尺度不同植被类型下土壤干层的空间分布 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 102–108.
- [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(D 辑: 地球科学)*, 2001, 31(3): 185–191.
- [36] CHEN H S, SHAO M G, LI Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2008, 143(1/2): 91–100.
- [37] SHANGGUAN Z P. Soil desiccation occurrence and its impact on forest vegetation in the Loess Plateau of China [J]. *International journal of sustainable development and world ecology*, 2007, 14(3): 299–306.
- [38] 王云强. 黄土高原地区土壤干层的空间分布与影响因素 [D]. 咸阳: 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), 2010.
- [39] 曹全意. 黄土高原地区可持续发展的探讨 [J]. *干旱区研究*, 1998, 15(1): 87–89.
- [40] 陈宝群, 赵景波, 李艳花. 黄土高原土壤干层形成原因分析 [J]. *地理与地理信息科学*, 2009, 25(3): 85–89.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 秦大河,罗勇.全球气候变化的原因和未来变化趋势[J].科学对社会的影响,2008(2):16-21.
- [44] 晏利斌.1961—2014年黄土高原气温和降水变化趋势[J].地球环境学报,2015,6(5):276-282.
- [45] 赵景波,孙贵贞,顾静,等.陕西省靖边县不同土层含水量与干层差异研究[J].水土保持通报,2007,27(5):1-5.
- [46] LI C Z, ZHAO L H, SUN P S, et al. Deep soil C, N, and P stocks and stoichiometry in response to land use patterns in the Loess Hilly Region of China[J]. PLoS One, 2016, 11(7):1-15.
- [47] 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:西北农林科技大学,2002.
- [48] 曹奇光.晋西黄土区人工刺槐林地土壤水分特征及合理密度研究[D].北京:北京林业大学,2007.
- [49] 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].草业学报,2004,13(6):14-20.
- [50] 刘刚,王志强,王晓岚,吴旗县不同植被类型土壤干层特征分析[J].水土保持研究,2004,11(1):126-129.
- [51] 曾辰,邵明安.黄土高原水蚀风蚀交错带柠条幼林地土壤水分动态变化[J].干旱地区农业研究,2006,24(6):155-158.
- [52] 余冬立.黄土高原水蚀风蚀交错带小流域植被恢复的水土环境效应研究[D].咸阳: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),2009.
- [53] 刘丙霞.黄土区典型灌草植被土壤水分时空分布及其植被承载力研究[D].咸阳: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),2015.
- [54] WANG Y Q, SHAO M A, LIU Z P, et al. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors[J]. Hydrological sciences journal, 2012, 57(2):265-281.
- [55] 万素梅,贾志宽,韩清芳,等.黄土高原半湿润区首蓆草地土壤干层形成及水分恢复[J].生态学报,2008,28(3):1045-1051.
- [56] ZHAO C L, JIA X X, ZHU Y J, et al. Long-term temporal variations of soil water content under different vegetation types in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2017, 158:55-62.
- [57] 韩仕峰.宁南山区首蓆草地土壤水分利用特征[J].草业科学,1990,7(5):47-53.
- [58] 李军,陈兵,李小芳,等.黄土高原不同干旱类型区首蓆草地深层土壤干燥化效应[J].生态学报,2007,27(1):75-89.
- [59] 杨文治.黄土高原土壤水资源与植树造林[J].自然资源学报,2001,16(5):433-438.
- [60] 王艳萍,王力,韩雪,等.黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征[J].生态学报,2015,35(22):7571-7579.
- [61] 梁海斌,史建伟,李宗善,等.晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林地土壤干燥化效应[J].水土保持研究,2018,25(2):87-93.
- [62] 赵忠,李鹏.渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征及抗旱性研究[J].水土保持学报,2002,16(1):96-99,107.
- [63] 李田湑,王俊,刘文兆,等.增施氮肥对黄土高原旱作冬小麦农田土壤干层动态的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(4):152-155,160.
- [64] ZHAO C L, SHAO M A, JIA X X, et al. Using pedotransfer functions to estimate soil hydraulic conductivity in the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2016, 143:1-6.
- [65] 李秧秧,邵明安.玉米单根木质部水势与径向水力导度的轴向变化[J].土壤学报,2003,40(2):200-204.
- [66] 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[J].中国生态农业学报,2003,11(3):113-116.
- [67] 赵栋,屠彩芸,李丹春.封育年限对干旱河谷灌丛土壤理化性质的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):39-44,49.
- [68] 井乐,李建平,张翼,等.黄土高原不同土地利用方式下土壤干层差异[J].草业科学,2018,35(8):1829-1835.
- [69] 王猛,袁福锦,吴文荣,等.封育对滇西北亚高山草甸群落及土壤的影响[J].草原与草坪,2017,37(2):69-74.
- [70] 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.
- [71] 田璐,张敬尧,高建恩,等.深层干化土壤水分恢复试验研究[J].农业机械学报,2019,50(4):255-262.
- [72] 刘恋.修剪限定生长下的枣树耗水特征研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [73] 汪星,高志永,汪有科,等.修剪与覆盖对黄土丘陵区枣林土壤干层的修复效应[J].林业科学,2018,54(7):24-30.
- [74] 曹玉军,魏雯雯,徐国安,等.半干旱区不同地膜覆盖滴灌对土壤水、温变化及玉米生长的影响[J].玉米科学,2013,21(1):107-113.
- [75] 胡敏,苗庆丰,史海滨,等.不同地膜覆盖对春玉米生长发育及水分利用效率的影响[J].干旱区资源与环境,2017,31(2):173-177.
- [76] 李丽霞,郝明德,李鹏,等.模拟降雨条件下不同材料覆盖对水分入渗特征的影响[J].水土保持研究,2004,11(3):46-47,87.

(上接第6页)

2.2 辐照剂量对不同品种发芽趋势的影响 从表2可以看出,金早47、中早39、黄华占、浙香银针、秀水134、秀水519、浙洋糯188、浙糯106、浙粳96、宁81对辐照处理敏感,随着剂量的增加,其发芽率在处理剂量小于300 Gy范围无显著差异,在500 Gy以上辐照剂量处理后出芽率、发芽率不同程度出现极显著下降。

3 结论与讨论

(1) $^{137}\text{Cs}-\gamma$ 射线对水稻种子具有较强的辐照效应。低剂量辐照对水稻种子发芽率无显著影响,低剂量辐照促进个别品种浙洋糯188、浙糯106、浙粳96萌发,原因可能是适当剂量的辐照处理会引起种子内部生物自由基或有关酶活性的变化,从而提高种子的新陈代谢水平,促进种胚组织细胞生长和分裂,提高种子活力^[10-11],这与该试验结论相一致。

(2) 不同遗传背景的品种之间对辐射敏感性不同,从试验结果来看,不同类型的品种辐照敏感性要大于同一类型品种,也就是说粳型和籼型间存在明显差异。该研究表明,粳型品种金早47、中早39、浙香银针的半致死剂量在600 Gy左右;籼型品种秀水134、秀水519、浙洋糯188、浙糯106、浙粳96、宁81的致死剂量在700 Gy左右。综合出芽率、发芽率,在700 Gy处理下的辐照敏感性依次为黄华占>中早39>浙香

银针>金早47>浙洋糯188>秀水519>秀水134>宁81>浙粳96>浙糯106,总体上表现为粳型品种>籼型品种。

参考文献

- [1] 刘宏波.防辐射与健康饮食[J].解放军健康,2020(4):23.
- [2] 张瑞勤,冯水英,祁永斌,等.不同作物品种对 ^{60}Co γ 射线的辐照敏感性[J].中国农学通报,2008,24(8):266-269.
- [3] LI S, ZHENG Y C, CUI H R, et al. Frequency and type of inheritable mutations induced by γ rays in rice as revealed by whole genome sequencing[J]. J Zhejiang Univ-Sci B (Biomed & Biotechnol), 2016, 17(12):905-915.
- [4] 朱子轶,叶胜海,翟荣荣.不同辐照强度和浸种时间对作物种子萌发的影响[J].安徽农业科学,2017,45(24):26-28.
- [5] 兰松龄,林兆松.水稻辐射育种研究的进展[J].福建稻麦科技,1993,11(1):9-14.
- [6] 陆艳婷,陈金跃,张小明,等.浙江省水稻辐射育种研究进展[J].核农学报,2017,31(8):1500-1508.
- [7] 沈圣泉,王彩霞,叶红霞,等. γ 射线诱发水稻粒色突变体的研究[J].核农学报,2006,20(5):358-360,364.
- [8] 刘庆龙,严文潮,俞法明,等.辐照 F_1 代干种子育成高产优质早粳品种福296[J].核农学报,2010,24(4):744-747.
- [9] 刘庆龙,严文潮,俞法明,等.高产抗病早粳品种福501的选育[J].核农学报,2012,26(6):884-887.
- [10] BORZOU EI A, KAFI M, KHAZAEI H, et al. Effects of gamma radiation on germination and physiological aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings[J]. Pakistan journal of botany, 2010, 42(4):2281-2290.
- [11] 吴天庭,王贤裕,周志远,等.低剂量 γ 射线辐照对水稻种子发芽、成苗的影响[J].种子,1993,12(2):13-15.