土壤特性对渠道护坡植草生长状况的影响

马志林[1,2]，张丽娅[3]，杨秋贵[1,2]，李虎星[1,2]，陈 芳[4]

(1.河南省水利科学研究院，河南 郑州 450003；2.河南省水利工程安全技术重点实验室，河南 郑州 450003；
3.华北水利水电大学，河南 郑州 450002；4.河南科光工程建设监理有限公司，河南 郑州 450003)

摘 要：[目的] 研究土壤理化性质的变化对渠坡植草生长的影响，为南水北调中线工程植草护坡及标准化管理提供科学依据。[方法] 以南水北调中线河南省新郑段渠坡为例，分析 4 个不同盖度典型植草护坡样方不同层次土壤理化性质及变化特征。[结果] ①秋季土壤水分比较适宜，浅层水分含量平均为 16.56%，深层水分含量平均为 16.91%，同一样方垂直剖面差异不大，不同样方浅层差异较明显。②土壤 pH 值平均在 8.5 左右，整体呈强碱性；平均容重在 1.37 左右，浅层小于深层。③有机质含量浅层平均为 0.34%，深层平均为 0.31%，不同盖度样方差异明显($p<0.05$)；全氮、全磷含量缺乏，全钾含量相对较高。[结论] 不同植草护坡盖度和生长状况渠坡土壤特征具有明显差异，但均属较差水平。渠坡植草生长状况除土壤自身特性外，还与草坪建植措施、长期极端干旱及不合理修剪等日常管护措施有较大关系。

关键词：渠坡植草；生长状况；土壤特性；南水北调中线工程

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)05-0106-07 **中图分类号**：S158.3

文献参数：马志林，张丽娅，杨秋贵，等. 土壤特性对渠道护坡植草生长状况的影响[J]. 水土保持通报，2019,39(5):106-112. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.015；Ma Zhilin, Zhang Liya, Yang Qiugui, et al. Effects of soil characteristics on grass growth of channel slope protection[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(5):106-112.

Effects of Soil Characteristics on Grass Growth of Channel Slope Protection

Ma Zhilin[1,2], Zhang Liya[3], Yang Qiugui[1,2], Li Huxing[1,2], Chen Fang[4]

(1. *He'nan Water Conservancy Science Academy, Zhengzhou, He'nan* 450003, *China*;
2. *He'nan Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security Technology, Zhengzhou, He'nan* 450003, *China*; 3. *North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan* 450002, *China*; 4. *He'nan Keguang Engineering Construction Supervision Co. Ltd, Zhengzhou, He'nan* 450003, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of various soil physical and chemical properties on plant growth on canal slopes were studied in order to provide a scientific basis for grassland slope protection and standardized management of the central route of the south-to-north water transfer project. [Methods] The physical and chemical properties and change characteristics at different levels of the typical grass slopes of four different coverages were analyzed by taking the slope of the Xinzheng section of the central route of the south-to-north water transfer project as an example. [Results] ① The soil moisture in autumn was more suitable, with an average moisture content of 16.56% in the shallow layer and 16.91% in the deep layer; the vertical profile difference within the same sample plot was not significant, and the shallow layer difference of the different quadrat was obvious. ② The soil pH value was about 8.5 on average, and the soil was strongly alkaline. The average soil bulk density was about 1.37, and the soil bulk density in the shallow layers was lower than that in the deeper layers. ③ The average content of organic matter was 0.34%, and the average depth was 0.31%, which differed significantly ($p<0.05$) depending on coverage in the quadrat. The soil was found to be deficient in total nitrogen and phosphorus, and the total potassium content was relatively high. [Conclusion] There were

收稿日期：2019-04-18 **修回日期**：2019-06-09

资助项目：河南省科技攻关计划项目“水利工程渠道边坡植被退化与修复示范研究”(172102110116)

第一作者：马志林(1964—)，男(汉族)，河南省南阳市人，博士，教授级高级工程师，主要从事工程绿化和水土保持生态修复研究。E-mail：mzlc_158@163.com。

obvious differences in soil characteristics, between different vegetation and degrees of grass slope protection, but all soil types were found to be of poor quality. Besides soil characteristics, the factors that affect the plant growth on canal slopes was also related to daily management and protection measures, such as lawn planting measures, the effects of long periods of extreme drought, and improper pruning.

Keywords: channel slope planting grass protection; vegetation growth status; soil characteristics; the south-to-north water transfer project

植草护坡是水利工程渠道边坡生态防护的主要形式，也成为渠道及堤防美化和生态建设的一项重要措施[1]。特别是南水北调中线工程总干渠长度 1 277 km²，基本都是露天明渠，多为土质边坡[2]，渠坡防护主要采用工程措施＋人工植草。具体办法就是在土质边坡的岸坡和外坡面采用单体人字形预制构件拼装成六棱混凝土框格，然后在混凝土六棱体框格内撒播草种，这是南水北调中线工程应用最普遍的一种植草护坡型式[3]。植草草种以普通高羊茅 *Festuca arundinacea* 和普通狗牙根 *Cynodon dactylon* 为主。由于干渠渠坡为挖方或填方边坡，植草土壤为人工填土，短时间内难以与原有边坡形成有机的土壤生态系统[4]，肥力和蓄水保墒能力有限，给植草生长造成影响[5]，不同渠段渠坡植草生长状况差异较大。有的渠段植草生长茂盛，盖度达 80 %以上，起到了良好的绿化护坡作用；有的渠段植草生长较差，盖度较低，难以起到绿化护坡作用。解决南水北调中线工程河南段渠坡植草生长不良、植草护坡及景观效果不佳的问题十份迫切。

前人关于植草护坡以及植草护坡与土壤特性的关系多有研究。对于植草护坡的研究，多集中在植草护坡机理[6-7]、植草根系特征对普通边坡固土抗蚀[8-9]、土壤抗剪强度[10-12]、土壤侵蚀性[13]、土壤渗透性[14]等方面；植草护坡与土壤特性的关系研究主要是普通边坡草本根系分布对土壤理化性质[15-17]的影响。针对大型水利工程如南水北调中线渠坡植草与土壤特征的研究还鲜见报道。本文以河南省新郑段为例，通过对渠坡植草生长状况调查和土壤取样检测，分析不同植草生长状况土壤特性，研究土壤理化性质的变化及对植草生长的影响，为南水北调中线工程河南段植草护坡和渠道标准化管理提供科学依据。

1　概况与方法

1.1　研究区概况

研究区位于南水北调中线工程河南新郑段，属温带大陆季风型气候区，夏秋两季多东南风，炎热多雨；冬春两季盛行西北风，干燥少雨。多年平均风速 2.1～2.5 m/s，最大风速 20.3 m/s；全年平均气温 14.4 ℃，极端最高气温 42.5 ℃，极端最低气温气温 －17.9 ℃，年均日照时数 2 114.2 h；海拔 132.06 m；多年平均降水量 699.0 mm，年均蒸发量 1 600 mm，无霜期 210 d，区域土壤属壤质潮土，质地沙壤，历年最大冻土深度 27 cm[18-19]。本文研究的植草渠坡主要是一级马道以上的岸坡和填方外坡两部分。

1.2　研究方法

1.2.1　*样方选取*　于 2017 年 10 月 26—27 日选取南水北调中线工程河南新郑段段的唐家门桥北右岸、王老庄桥北 100 m 右岸、毛庄北桥北 100 m 右岸、唐家门桥南 100 m 右岸 4 个不同生长状况人工植草护坡典型渠段进行植被和土壤调查取样。并按植草生长状况划分为 4 个不同类型的样方[20]：盖度＞95％为长势好的唐家门桥北右岸样方 SD，盖度 80％～85％为长势较好的王老庄桥北右岸样方 ND，盖度 50％～60％为长势一般的毛庄北桥右岸样方 LD，盖度＜20％为长势差的唐家门桥南右岸样方 MD。4 个样方渠坡均为填方边坡，优势植物种均为人工种植的高羊茅，主要杂草有小飞蓬 *Conyza canadensis*、香附子 *Cyperus rotundus*、泥胡菜 *Hemistepta lyrata* 等。SD 为人工管理的植草试验地，高羊茅为节水型低矮品种 *water saver*；ND，LD，MD 均为粗放管理的样方，高羊茅均为普通品种。高羊茅为冷季型，秋季气温适宜，蒸发减少，土壤水分大，更有利于生长。

1.2.2　*调查方法*　对所选不同生长状况的 4 个典型样方进行植被调查，准确记录各个样方的地理位置、坡度、坡向、坡长、土壤类型等，详细描述记录样方特征、生境状况、植草长势及杂草状况，采用针刺法测定植草盖度，并在样方内随机选取 10 株草本用直尺量取株高、冠幅，取平均值。同时根据渠坡植草根系特征对 4 个样方进行土壤取样，每个样方随机取 3 个样点，采用多点混合取样法[21-22]，取样深度为 10 cm 和 20 cm，按上下 2 层取样，共取样 24 个。

1.2.3　*分析方法*　土壤取样样品带回实验室进行理化性质定量分析，测定 pH 值、容重、全氮、全磷、全钾、有机质、水分、速效钾、速效磷、阳离子交换量等[23]。其中 pH 值采用电位测定法；容重采用环刀

法取样烘干称重法；速效磷采用硫酸钼锑抗比色法；速效钾采用火焰光度法；全氮采用重铬酸钾硝化蒸馏法；全磷采用钼锑抗比色法；全钾用火焰光度法；有机质采用重铬酸钾氧化—稀释热法。数据在 Excel 2003 软件中进行整理，利用 SPSS21.00 软件，采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差法(least-significant difference, LSD)对数据进行检验，用 Pearson 相关系数判定因子的相关性。

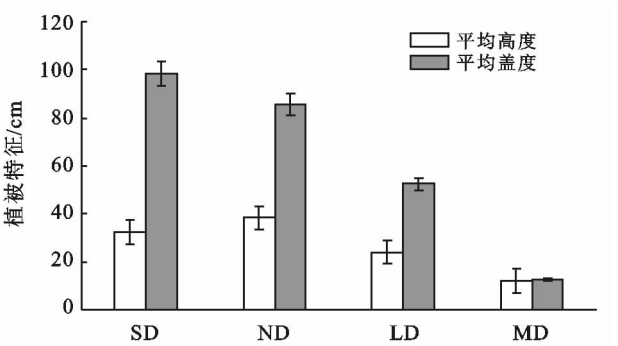
2 结果与分析

2.1 不同生长状况渠坡植被特征

4 个不同植草样方外貌景观变化特征比较明显，不同生长状况植草盖度差别较大(如图 1)，植草的高度、密度、冠幅、长势等也有明显变化。长势最好、盖度最大的 SD 样方植草高度低于 ND 样方，是因为试验地采用了节水低矮型高羊茅品种，生长期最大观测高度平均为 32.4 cm，基本符合南水北调渠坡植草高度低于 30 cm 的管理要求。ND，LD 和 MD 样方均为普通高羊茅品种，自然生长高度可达 70 cm 以上，需要进行不定期刈割修剪，使草层高度不超过 40 cm，以保持渠坡植草的均匀整齐。ND 和 LD 样方除了生境等因素，由于刈割时间不同也影响了观测高度。生长好、盖度大的样方，杂草很少，优势种突出。生长最差的 MD 样方高羊茅密度很低，仅 5～6 株/m^2，均高 15 cm，冠幅 6～15 cm，生长期末平均盖度仍只有 12.4%，杂草较多，土壤表层有 1～2 mm 苔藓覆盖。

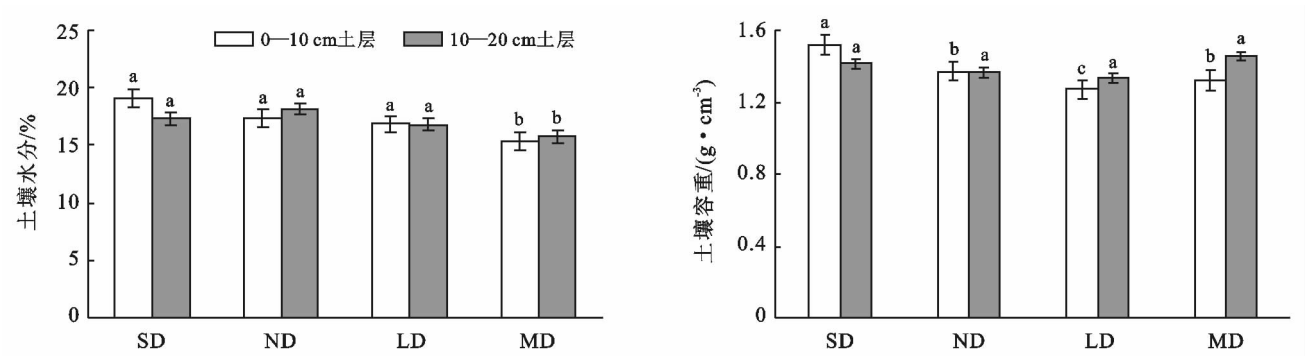
2.2 不同植草生长状况渠坡土壤特征分析

2.2.1 不同植草生长状况土壤水分和容重 南水北调中线渠坡上千公里，植草面积巨大，难以保证实时灌溉，因此土壤水分及植物生长主要受天然降水制约，同时还与地面覆盖、蒸腾蒸发、坡度坡向等有关[24]。秋季土壤含水量相对比较适宜，利于植物生长。4 个不同样方 0—10 cm 草种根系主要分布层土壤水分含量在 15.43～19.17%之间，较深层的 10—20 cm 土壤水分含量在 15.78～17.32%之间；同一样方中，垂直剖面上浅层和深层土壤水分含量差异不显著。由图 2 可以看出，不同植草盖度样方浅层土壤水分差异比较明显，4 个样方中浅层土壤水分随着群落植被盖度降低而减少。与 SD 样方相比，植被较好的 ND、LD 样方水分含量差别不大，而与生长植被较差的 MD 样方差异性较显著，说明 SD，ND，LD 样方植被盖度大，蓄水保水能力较强，土壤蒸发较弱；MD 样方植被差，盖度小，土壤蒸发相对较强，蓄水保水能力弱。SD 样方由于前期进行了灌溉，所以浅层高于深层；其他 3 个样方均表现为深层略高于浅层或持平。



注：SD 为盖度＞95%的样方；ND 为盖度 80%～85%的样方；LD 为盖度 50%～60%的样方；MD 为盖度＜20%的样方。下同。

图 1 4 种不同生长状况渠坡植被特征



注：同一指标不同字母(a，b，c)表示不同植被盖度间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2 不同植草盖度渠坡土壤水分和容重变化

4 个样方 0—10 cm 土壤容重在 1.27～1.52 g/cm^3 之间，平均为 1.37 g/cm^3；10—20 cm 深层土壤容重在 1.34～1.46 g/cm^3 之间，平均为 1.38 g/cm^3，浅层小于深层。平均容重均大于 1.3 g/cm^3，说明土壤结构较差。植被盖度不同，浅层土壤容重差异较明显，深层土壤差异较小。

2.2.2 不同植草生长状况土壤 pH 值、有机质和阳离子交换量 如图 3 所知，渠坡 0—10 cm 土壤层 pH

值在 8.48～8.55 之间,平均为 8.51,10—20 cm 土壤层 pH 值 8.44～8.60 之间,平均为 8.53,不同盖度样方浅层和深层差别不大,均属 6 级[25],呈强碱性,不利于氮和磷的有效利用。

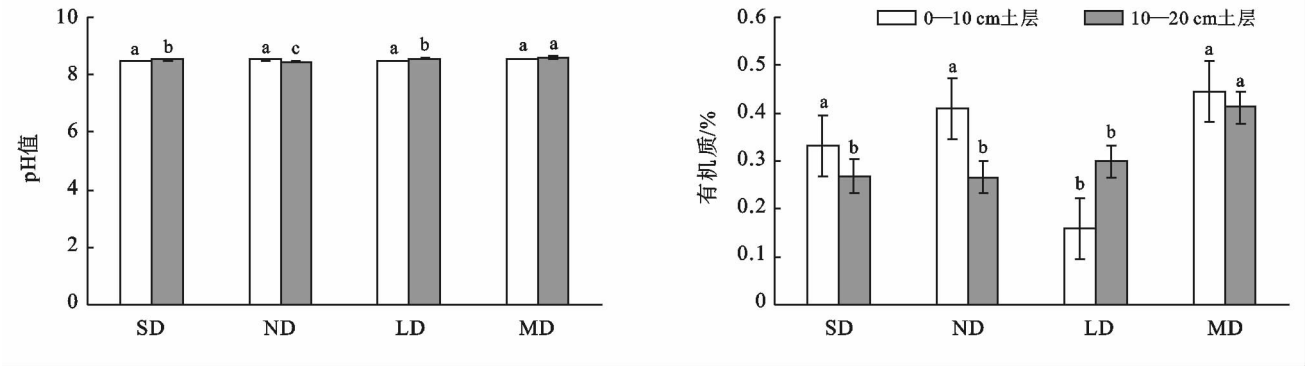


图 3　不同植草盖度渠坡土壤 pH 值和有机质含量变化

渠坡种植土壤有机质含普遍较低。草种根系主要分布层 0—10 cm 土壤有机质含量在 0.16%～0.45%之间,平均为 0.34%,属 6 级水平;10—20 cm 土壤层有机质含量在 0.27%～0.41%之间,平均为 0.31%,属 6 级水平,浅层和深层有机质均属极缺乏[25]。总体来说,浅层略高于深层(除 LD 外)。不同植被盖度样方土壤浅层和深层有机质含量均存在显著差异($p<0.05$)。

由图 4 可知,浅层土壤阳离子交换量(CEC)在 13.03～22.02 cmol/kg 之间,平均为 15.65 cmol/kg,在 LD 样方出现最大值;深层在 11.79～13.65 cmol/kg 之间,平均为 13.01 cmol/kg。CEC 值主要在 10～20 cmol/kg 之间,在 LD 样方出现峰值,整体波动不大,说明土壤保肥能力中等,浅层略好于深层,浅层土壤 CEC 值存在显著性差异($p<0.05$)样方。

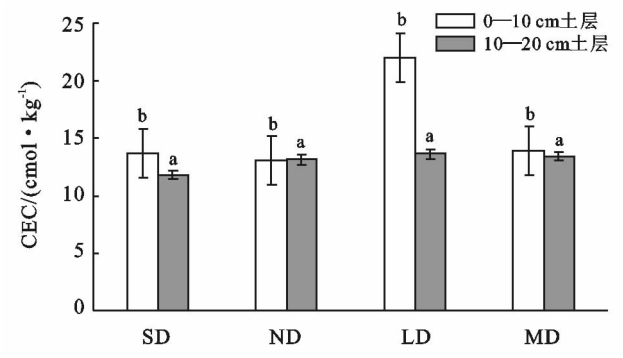


图 4　不同植草盖度渠坡土壤阳离子交换量 CEC 变化

2.2.3　不同植草生长状况土壤氮磷钾含量　由图 5 可知,渠坡土壤全氮含量普遍较低,属极缺乏[25],全氮含量在不同盖度样方变化不明显(仅在 SD 样方深层出现最大值,可能与施肥灌溉后下渗有关)。除 SD 样方外,浅层全氮含量均略高于深层,和有机质含量表现基本一致[26]。浅层和深层土壤速效氮含量变化均有波动,存在显著性差异($p<0.05$)。

4 个样方浅层和深层土壤全磷含量均属 6 级水平,属极缺乏[25]。全磷含量在不同群落盖度变化中相对稳定(如图 5)。速效磷含量浅层土壤平均值为 4.09 mg/kg,属于 5 级水平,深层土壤平均值为 2.76 mg/kg,属于 6 级水平;除了 LD 样方外,其他 3 个样方速效磷含量基本稳定。LD 样方浅层速效磷含量明显高于其他 3 个样方,主要原因除了全磷含量略高外,可能还与土壤较黏重有关[27]。

土壤全钾含量浅层和深层均属 2 级水平[25],含量相对较高,不同植被盖度样方变化明显,深层和浅层差异均达到显著水平($p<0.05$)。速效钾含量浅层均高于深层,不同植被盖度之间浅层和深层均达到显著差异水平($p<0.05$)(如图 5)。ND 和 MD 样方全钾含量较高,可能与地貌和填土土质[28-30]有关;LD 和 MD 样方速效钾含量较高,可能与 CEC 值较高有关[31-32]。

2.3　土壤理化特征与植草盖度间的 Pearson 综合相关分析

Pearson 相关分析表明,植草盖度与容重之间存在显著的负相关关系($p<0.05$),说明容重大,土壤太过板结,不利于植草生长(如表 1)。有机质与全氮、全磷、速效钾之间存在极显著的相关关系($p<0.01$),与阳离子交换量之间为负显著相关($p<0.05$),其中与速效钾的相关性最大,相关系数达到 0.76。即全氮、全磷和速效钾的含量随有机质含量的增加而增加,全氮与其他养分之间均存在显著或极显著的相关关系[33]。因此,渠坡植草护坡管理中,应尽量少修剪,让干枯茎叶自行腐烂于土壤,增加土壤有机质,同时试种豆科草种护坡,提高土壤固氮能力,进而改良土壤,逐步形成良性循环的草地护坡土壤生态系统。

表 1 土壤理化特征与植草生长状况(盖度)间的 Pearson 相关关系

指标	pH值	水分/%	容重/(g·cm^{-3})	有机质/%	CEC/(cmol·kg^{-1})	全氮/%	全磷/%	全钾/%	速效氮/(mg·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})	盖度/%
pH值	1											
水分/%	0.194	1										
容重/(g·cm^{-3})	−0.179	0.036	1									
有机质/%	−0.384**	−0.385**	0.087	1								
CEC/(cmol·kg^{-1})	−0.05	0.481**	−0.013	0.009	1							
全氮/%	−0.396**	−0.774**	0.016	0.735**	−0.402**	1						
全磷/%	−0.332**	−0.266*	0.051	0.348**	−0.139	0.326**	1					
全钾/%	−0.256*	−0.108	0.091	0.214	−0.071	0.246*	0.024	1				
速效氮/(mg·kg^{-1})	0.042	0.035	−0.021	0.031	0.047	−0.006	0.103	0.083	1			
速效磷/(mg·kg^{-1})	−0.273*	0.304*	−0.009	0.137	0.392**	−0.208	0.057	−0.061	−0.02	1		
速效钾/(mg·kg^{-1})	−0.415**	−0.507**	0.145	0.757**	−0.022	0.727**	0.252*	0.361**	−0.067	0.102	1	
盖度/%	−0.023	0.031	−0.275*	0.009	−0.011	−0.043	0.068	0.118	0.114	−0.036	−0.14	1

注:** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

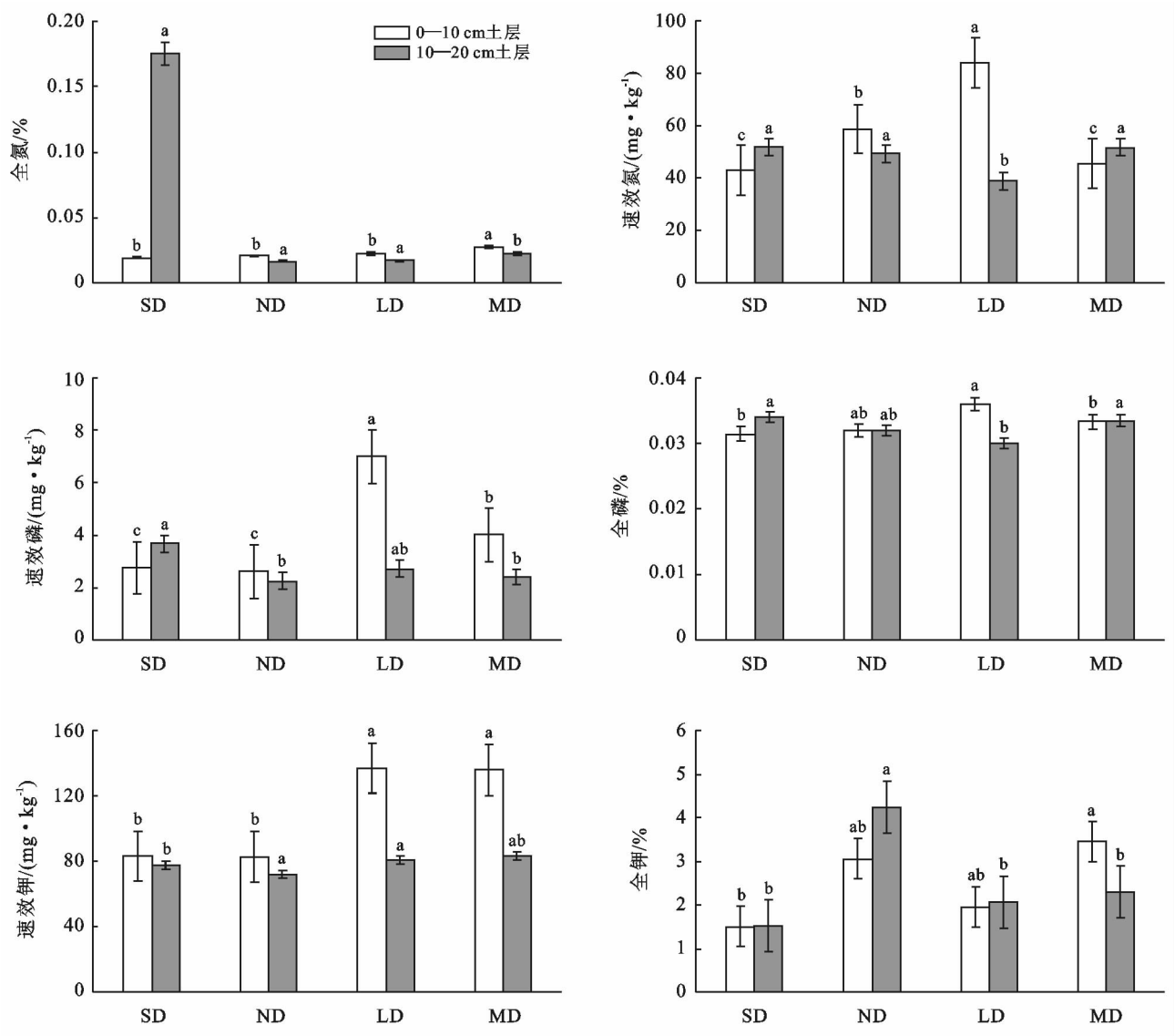


图 5 不同植草盖度渠坡土壤氮磷钾含量变化

3 讨 论

3.1 渠坡土壤理化性状与植草生长的关系

南水北调中线渠坡主要为填方或挖方边坡,渠坡种植层土壤均为人工填土,腐熟需要时间,而且为了保证水质绝对安全,绿化种植中不宜施肥,也不可使用化学除草剂和农药,人工对土壤肥力干预有限;每年频繁割草也造成了土壤养分的转移,所以渠坡种植土壤养分含量普遍过低[25],土壤理化性能较差。

由图 3 可知,不同植草生长状况对土壤有机质含量有较大影响,土壤全层有机质含量总体上均随盖度增大而减小,可能跟生长旺盛的植被群落土壤环境相对较好,有机质分解较快以及土壤养分消耗较大有关。盖度小的 MD 样地有机质含量较高,ND,LD 样地有机质含量较低,这与蔡晓布等[34]对藏北紫花针茅高寒草原的研究结果是一致的。可能是由于盖度大的样地植物生长旺盛,对土壤有机质消耗较高的原因。

3.2 植草生长不良的原因

南水北调中线渠坡人工种植的冷季型高羊茅是十份耐干旱耐瘠薄的草种,在非极端干旱情况下均能正常生长。SD 样地为人工管理的高羊茅试验样地,生长最好,ND 和 LD 样地高羊茅密度较大,因此盖度较高;MD 样地高羊茅密度小,盖度仅有 12.4%,生长不良(如图 1)。可能是由于草坪建植中出苗不均、密度太小,或是因为不合理修剪、频繁刈割、留茬高度太低,加之渠坡渗水保墒能力差及长时间干旱造成的高羊茅退化[35]。

3.3 关于植草护坡管理理念

南水北调中线渠坡为大面积植草生态护坡,不必要也不可能像城市草坪那样实时修剪的低矮平整,主要应突出草被的自然景观属性和生态护坡功能,可以让人工草和杂草自然生长演替,保持一定的高度和盖度,通过一定的简单修剪措施,达到整齐美观的效果[1,36];促进形成具有植物多样性的自然渠坡草地护坡系统,不仅能够充分发挥保温保墒和抗击雨滴激溅侵蚀的固土护坡作用,增强抗旱能力,还可以大大降低管理成本和管理难度,实现粗管理、低成本、可持续的渠坡生态绿化防护目标。

4 结 论

(1) 渠坡土壤秋季水分普遍较好,4 不同样地土壤浅层和深层水分含量平均为 16.56%和 16.91%,适宜植草生长,但生长状况、盖度和外貌景观差异较大。

(2) 4 种不同植草盖度渠坡土壤浅层和深层 pH 值平均为 8.51 和 8.53,均呈强碱性;容重平均为 1.372 g/cm^3 和 1.377 g/cm^3,土壤比较紧实;有机质平均为 0.336%和 0.312%,全氮平均为 0.023%和 0.058%,全磷平均为 0.033%和 0.032%,根据全国第二次土壤普查养分含量分级标准,均属 6 级水平,有机质、全氮、全磷均为极缺乏;只有全钾含量较高,达 2 级水平。盖度不同、长势差别较大的 4 个样地土壤理化特征具有显著性差异,但土壤质量总体较差,不利于植草生长。土壤特性对渠坡植草生长好坏影响有限,草坪建植措施不当,出苗不均,频繁刈割,留茬太低,加之渠坡长时间极端干旱也导致了部分人工植草生长不良。

(3) 相关分析表明,植草盖度与土壤容重成反比,土壤过于板结不利于植草生长;有机质与全氮、全磷和速效钾之间存在极显著的相关关系($p<0.01$)。

[参 考 文 献]

[1] 李明.堤防植草现状与管理问题分析[J].中国水利,2015(16):29-30.

[2] 孟庆亮.南水北调中线工程渠道土质边坡防护技术研究[J].水利水电施工,2015(1):28-30.

[3] 赵良辉,辛春强,赵凯选.浅谈南水北调中线工程框格护坡预制安装技术[J].河南水利与南水北调,2013(15):50-51.

[4] 尹金珠,朱凯华,史翔宇,等.庆丰采石场岩质边坡植被恢复状况和土壤特性研究[J].水土保持通报,2012,32(1):144-149,155.

[5] 陈叶,闫芳,马银山,等.干旱胁迫对窄叶鲜卑花种子萌发及幼苗生长的影响[J].水土保持通报,2018,38(6):29-34.

[6] 郑启萍,徐得潜.草本植物护坡机理及其固土效应试验研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2014,37(2):225-228.

[7] 程艳.5 种常见草本植物固土护坡机理与效应研究[D].山西 太谷:山西农业大学,2012.

[8] 郝郑芳.高速公路切方边坡防护草本植物根系固土能力研究[D].四川 雅安:四川农业大学,2014.

[9] 李建兴.三峡库区不同护坡草本植物根系的固土抗蚀效应研究[D].重庆:西南大学,2013.

[10] 张兴玲,胡夏嵩.青藏高原东北部黄土区草本植物根系加筋土的抗剪特性[J].水土保持通报,2013,33(4):185-188.

[11] 李建兴,何丙辉,谌芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.

[12] 曹磊,马海天才.不同草本植物根系力动力学及抗压力特征研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(1):164-170.

[13] 秦嘉惠,程谅,曹丹妮,等.两种草本植物根系对土壤可蚀性的影响[J].水土保持研究,2019,26(2):55-61.
[14] 李建兴,何丙辉,谌芸.不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2013,33(5):1535-1544.
[15] 黄张玲.植被恢复对路堑边坡侵蚀及土壤理化性质的影响研究[D].湖北 武汉:华中农业大学,2013.
[16] 韩凤朋,郑纪勇,张兴昌.黄土退耕坡地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):50-55.
[17] 陶俊.三峡库区不同护坡草本根系分布对土壤理化性质的时间尺度效应[D].重庆:西南大学,2013.
[18] 陈罗成.新郑市气候变化特征分析及其影响[D].甘肃兰州:兰州大学,2017.
[19] 贾志清,卢琦,陈永富,等.南水北调中线工程总干渠沿线植物护坡模式与技术[J].林业科学,2004,40(4):94-98.
[20] 张云霞,李晓兵,陈云浩.草地植被盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述[J].地球科学进展,2003,18(1):85-93.
[21] 张磊,苏芳莉,郭成久,等.灰色关联分析在不同生态修复模式土壤质量评价中的应用[J].沈阳农业大学学报,2009,40(6):703-707.
[22] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价[J].生态学报,2006,26(3):901-913.
[23] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
[24] 李小英,段争虎.黄土高原土壤水分与植被相互作用研究进展[J].土壤通报,2012,43(6):1508-1514.
[25] 全国土壤普查办公室.中国土壤[M].北京:中国农业出版社,1995.
[26] 赵自稳,郭晓敏,牛德奎,等.不同季节和退化程度下山地草甸土壤氮素含量的变化[J].南方农业学报,2015,46(8):1401-1405.
[27] 贾兴永,李菊梅.土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究[J].中国土壤与肥料,2011(6):76-82.
[28] 易玉林.河南省土壤养分状况研究[J].河南科学,2012,30(7):882-886.
[29] 李贵宝,尹澄清,孙克刚,等.河南省土壤库中钾养分资源状况的研究[J].自然资源学报,2000,15(2):138-142.
[30] 刘序,李华兴,胡月明,等.大尺度下广东赤红壤全钾含量与地形因子相关分析[J].土壤通报,2010,41(4):886-891.
[31] 江叶枫,郭熙.基于协同克里格的耕层土壤速效钾空间异质性研究[J].浙江农业学报,2019,31(1):139-148.
[32] 全思懋,管晓进,王绪奎,等.江苏省域农田土壤速效钾含量变化及其影响因子研究[J].土壤,2019,51(2):257-262.
[33] 肖德荣,田昆,张利权.滇西北高原纳帕海湿地植物多样性与土壤肥力的关系[J].生态学报,2008,28(7):3116-3124.
[34] 蔡晓布,张永青,邵伟.藏北高寒草原草地退化及其驱动力分析[J].土壤,2007,39(6):855-858.
[35] 马志林,李杰君,李虎星,等.南水北调中线工程渠坡植草护坡问题[J].中国水利,2019(6):44-45,57.
[36] 岳星慧.杂草在边坡生态恢复中的应用[J].青海科技,2006,13(3):42-44.

(上接第 105 页)

[14] 塔莉,杨新兵,朱辰光,等.华北土石山区森林枯落物与土壤水文效应研究[J].河北农业大学学报,2015,38(3):59-63.
[15] 彭玉华,谭长强,何琴飞,等.台湾桤木与不同树种混交初期土壤理化性质的对比分析[J].中南林业科技大学学报,2018,38(11):22-28.
[16] 涂志华,范志平,孙学凯,等.大伙房水库流域不同植被类型枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持学报,2019,33(1):127-133.
[17] 王梓默,何怀江,林士杰,等.吉林省西部不同林分类型凋落物与土壤持水能力研究[J].吉林林业科技,2019,48(1):21-26,33.
[18] 宣立辉,康凡,谷建才,等.冀北地区典型林分枯落物层与土壤层的水文效应[J].水土保持研究,2018,25(4):86-91.
[19] 彭玉华,黄小荣,申文辉,等.林型差异对土壤理化性状及其持水能力的影响[J].中南林业科技大学学报,2017,37(8):1-5,17.
[20] 孙立博,余新晓,陈丽华,等.坝上高原杨树人工林的枯落物及土壤水源涵养功能退化[J].水土保持学报,2019,33(1):104-110.