

黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响

赵富王, 王 宁, 苏雪萌, 李秋嘉

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西师范大学地理学国家级实验教学示范中心, 西安 710119)

摘要: 植物根系是植物与土壤进行物质交换的通道, 在土壤侵蚀严重、生态脆弱的黄土丘陵区, 深入认识根系对土壤理化性质的影响具有重要意义。选取了白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、苔草(*Carex lanceolata*)、芨芨草(*Artemisia leucophylla*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、柠条(*Caragana intermedia*) 6 种植物作为研究对象, 取 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50、50—60 cm 土层根系和土样, 分析不同土层各物种根长密度、根表面积密度、平均根直径、土壤有机质(SOM)、土壤容重以及各级水稳性团聚体重量百分含量。结果表明: 所研究植物根系以细根为主。在 0—20 cm 土层中, 白羊草、苔草根长密度显著大于其余植物($P<0.05$), 表现为苔草>白羊草>铁杆蒿>芨芨草>狼牙刺>柠条, 平均根直径则相反。根系能不同程度地增加 SOM 含量, SOM 含量与根系平均直径和根系表面积密度呈极显著的正相关关系($P<0.01$)。在土壤剖面上, 水稳性团聚体重量百分含量明显减少的是白羊草、苔草和铁杆蒿样地, 水稳性团聚体重量百分含量随土层深度变化不明显的是芨芨草、狼牙刺和柠条样地。根表面积、根长密度能够显著增加 0.5~2 mm 水稳性团聚体重量百分含量($P<0.05$), 说明根系能够使小粒径团粒凝聚成更大粒径的土壤团粒。根系能够提高土壤有机质含量, 增加中等粒径团聚体含量, 改善土壤结构, 提高土壤稳定性, 对增加土壤抗蚀性起到重要作用。

关键词: 黄土丘陵区; 根系特性; 土壤有机质; 土壤水稳性团聚体

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)05-0105-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.016

Effects of Main Plant Roots on Soil Organic Matter and
Aggregates in Loess Hilly Region

ZHAO Fuwang, WANG Ning, SU Xueming, LI Qiujia

(National Experimental Teaching Demonstration Center of Geography Science,
College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119)

Abstract: Plant root system is the channel of material exchange between vegetation and soil. In the loess hilly area with serious soil erosion and fragile ecology, it is great significance to deeply understand the influence of root system on soil physical and chemical properties. In this study, six plant species were taking as research objects, which were *Bothriochloa ischaemum*, *Carex lanceolata*, *Artemisia leucophylla*, *Artemisia gmelinii*, *Sophora viciifolia* and *Caragana intermedia*. Roots and soil samples of 0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50 and 50—60 cm soil layers were taken. The root length density, root surface area density, mean root diameter, soil organic matter, soil bulk density and water stable aggregate content of each species in each soil layer were analyzed. The results showed that the roots of the species studied were mainly fine roots. In the 0—20 cm soil layer, the root length density of herbaceous plants was significantly higher than those of other species ($P<0.05$), which followed the order of *B. ischaemum* > *C. lanceolata* > *A. leucophylla* > *A. gmelinii* > *S. viciifolia* > *C. intermedia*, while the average root diameter was opposite. The root system could increase the SOM content in varying degrees, and the SOM content had a significant positive correlation with the root mean diameter and root surface area density($P<0.01$). In the soil profile, the weight percentage of water-stable aggregate significantly decreased in the sample plots of *B. ischaemum*, *C. lanceolata* and *A. sacrorum*. The weight percentage of water-stable aggregates did not change significantly with depth in the sample plots of *A. leucophylla*, *S. viciifolia* and *C. intermedia*. Root surface area and root length density could significantly increase the weight percentage of water-stable agglomerates of 0.5 ~ 2 mm

($P < 0.05$), which indicated that the root system could agglomerate small-size aggregates into larger-size soil aggregates. The above research results showed that root system could increase soil organic matter content and medium-size aggregate content, improve soil structure and soil stability, and played an important role in increasing soil corrosion resistance.

Keywords: Loess hilly region; root characteristics; soil organic matter; water stable soil aggregate

黄土丘陵区是中国乃至全球侵蚀最为严重的地区之一^[1],该区域土壤易蚀性、典型的季风性气候以及人类活动等因素作用下,生态脆弱,侵蚀强烈。有研究^[2]发现,植被恢复是保持水土、改善生态环境最根本的途径。经过多年的努力,黄土丘陵区生态得到改善,植被覆盖度不断增加^[3-4],由于地下不易于观测,因而地下被认为是一个有待研究黑箱,对于地下的研究越来越受到重视,尤其在黄土高原生态脆弱区,根系的护土保肥效应明显,植被恢复不仅改善地上部分环境,同时影响土壤特性,如增加有机质含量、改善土壤结构、提高土壤抗侵蚀性和稳定性等^[5]。

细根($< 2\text{ mm}$)是植物吸收或释放物质的主要通道^[6],植物根系吸收养分的同时,根系的空间分布、新陈代谢、根系分泌物、根系脱落物及死根腐烂都会对土壤理化性质产生影响^[7]。有研究^[8]表明,直径 $d \leq 1\text{ mm}$ 须根可以有效提高土壤水稳性团聚体数量,进而增加土壤抗冲性。更深入的研究^[9]发现,大粒径土壤团聚体是小粒径土壤团聚体在植物根系和菌丝共同缠绕作用下形成的,特别是植物细根能够提高大粒径团聚体的含量和土壤团聚体的总量;团聚体的形成除了与根系的穿插、挤压和缠绕等机械作用有关外,根系分泌物加速黏结土壤颗粒也在大团聚体形成过程中起到重要作用。因此,根系对土壤团聚体的形成与稳定都有重要作用。人们^[10]普遍认为,无论是小粒径团粒还是大团聚体,均由微生物(细菌,真菌)和植物根系交互组装作用的结果。所以,植物根系与土壤团聚体及有机质之间存在着直接的相互作用关系。

关于退化生态系统植被恢复演替的研究已做过很多研究,由于土壤资源空间异质性的影响,同时根系在影响土壤养分的分布上起着重要作用^[11],尤其是对有机质的影响显著,在不同地形条件下根系能够不同程度增加有机质含量^[12]。植物根系产生并输入土壤的有机碳是地上部分的 2.3 倍^[13]。黄土高原地区植被根系的分布特征已做了较多研究,同时根系与土壤环境的作用关系也取得一定成果。在黄土丘陵区研究^[14]发现,根系具有明显的垂直分布特征,在有根系的土层中土壤有机质明显增加。同时在改善土壤结构方面,根系提高了 $> 3\text{ mm}$ 团粒对水稳性团聚体的含量^[15]。然而不同植被类型根系对不同粒径团聚体以及有机质之间的关系研究较少。本文在全面研究主要物种在不同土

壤层次的根长密度、根表面积密度、比根长、根系生物量以及平均根直径等特性的基础上,通过根系特性与土壤物理化学性质的分析,希望进一步了解根系与土壤环境的作用机制,为黄土丘陵区生态恢复以及土壤侵蚀机理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

延河流域的地理位置为 $36^{\circ}21' - 37^{\circ}19' \text{N}$, $108^{\circ}38' - 110^{\circ}29' \text{E}$,地处陕西省北部的黄土高原中部。该地区气候属于暖温带半干旱大陆性季风气候区,年均降水量 520 mm ,降水分布不均匀,年内降水时间分配不均匀,7—9月的降水量占年降水量的 62% 。黄绵土为该地区主要的土壤类型,其中粉粒占 $64\% \sim 73\%$,黏粒占 $17\% \sim 20\%$,土质疏松,抗蚀抗冲性差,水土流失严重。在中低山地局部存在稀少的天然次生林,不过大部分植被已被旱化,呈现草原景观。主要植物有猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、芨蒿(*Artemisia leucophylla*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、苔草(*Carex lanceolata*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、柠条(*Caragana intermedia*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等。由于地理位置处于半干旱与干旱气候区的过渡带,气候变化剧烈,地形、地貌破碎,人类活动对植被的影响等多种因素的影响,使得该区成为黄土高原水土流失最为严重的地区,且生态环境极其脆弱。

1.2 植物和样地选取

根据初步的野外调查结果,在安塞区坊塌小流域选取主要物种白羊草、苔草、芨蒿、铁杆蒿、狼牙刺、柠条作为研究对象,以农地作为对照。其中狼牙刺、柠条属于灌木,铁杆蒿、芨蒿属于直根系半灌木,白羊草、苔草属于须根系多年生草本植物。每个物种选取其种群长势良好的 1 个坡面作为调查样地,并选取 1 片种植马铃薯的农地作为对照样地,农地内无杂草,马铃薯一年一熟。样地基本信息见表 1。

1.3 试验设计

于 2018 年 5 月 21—25 日进行野外试验,每个试验样地按照“S”形选取 5 株(丛)平均长势的植株,在其侧面进行根系和土壤样品采集。测试项目包括根系分布特征、土壤容重、土壤团聚体和土壤有机质。

用挖掘法进行根系采样(土柱每层:15 cm×15 cm×10 cm),一共分为 6 层(0—10,10—20,20—30,30—40,40—50,50—60 cm)。用铁锹分层取出土样,抖掉无根的土,剩余含有根的土样装入自封袋内,带回实验室,经过 5,3 mm 套筛,分离出所有根系,所研究物种生物量占绝对优势,在生态功能上起主导作

用^[16],所以根据根系的形态、颜色、味道等综合筛选出研究目标物种的根系,去除其他物种根系,然后用清水洗净根系表面所有泥土,再用 Epson V700 PHOTO 根系分析系统分析根系。最后将根系放入烘箱中,恒温 65 ℃烘干 48 h 后称重,称量结果精确到 0.001 g。每层土壤容重采用环刀法分层测定。

表 1 样地信息

植被种群类型	生活型	海拔/m	坡度/(°)	坡向	盖度/%	恢复年限/a
狼牙刺	灌木	1266	40	阳坡	72	老荒坡
柠条	灌木	1385	16	阳坡	85	老荒坡
铁杆蒿	半灌木	1266	15	阴坡	40	15
芨蒿	多年生草本	1338	20	阳坡	70	15
苔草	多年生草本	1107	35	阴坡	60	老荒坡
白羊草	多年生草本	1266	40	阳坡	40	老荒坡

根系测量指标主要有:
平均直径(MRD),所有根系平均直径(mm);
根长密度(RLD),单位体积土壤中含有根长度(mm/cm³);

$$RLD=L/hb^2 \tag{1}$$

比根长(SRL),单位重量(干重)根系长度(m/g);
$$SRD=L/10m \tag{2}$$

根系表面积密度(RSD),单位体积土壤中含有的根系的总表面积(mm²/cm³);

$$RSD=\pi LR/hb^2 \tag{3}$$

式中: L 为根系长度(mm); R 为平均根直径(mm); h 为每层土的深度(cm); b^2 为每层采样土面积(cm²); m 为每层土壤内根干重(g)。

土壤团聚体测定,用铁盒分别采集典型植被下各层原状土样,将采集的原状土带回实验室自然风干 1 周后,将较大块土体沿自然结构轻轻掰成小土块,除去石砾、动植物残体等杂质,各层土样分别过套筛,孔径依次为 5,3,2,1,0.5,0.25 mm。筛分后的土样按径级分别装入自封袋内,称重后备用。湿筛法—改进的 Yoder 法^[17]:使用仪器 DIK-2012 土壤团粒分析仪,将干筛法得到的各粒级团聚体配置 50 g,将上述按比例配好的 50 g 样品倾入 2 mm 的沉降筒里,然后依次安装好 1,0.5,0.25,0.106 mm 的筛子,让样品在水中浸泡 10 min,让全部土样达到水分饱和状态,以 30 次/min 上下振荡 20 min。清洗留在各级筛子上的样品,用干燥箱烘干土样,各筛子上的土样重量即为各级水稳性团聚体重量。

$$MWD=\sum_{i=1}^6 M_i \div 50 \times D_i \tag{4}$$

式中:MWD 为平均重量直径(g·mm); M_i 为湿筛第 i 个孔径内的质量(g); D_i 为第 i 个筛子平均直径(mm);50 为各粒级团聚体配置总量(g)。

用外加热重铬酸钾容量法—外加热法^[18]测定各粒级团聚体总有机质的含量。土壤有机质计算公式为:

$$SOM=\frac{\frac{c \times 5}{v_0}(v_0-v) \times 10^{-3} \times 3.0 \times 1.1}{m \times k} \times 1000 \tag{5}$$

式中:SOM 为土壤有机质含量(g/kg); c 为 0.800 0 mol/L (1/6 K₂Cr₂O₇)标准溶液的浓度;5 为重铬酸钾标准溶液加入的体积(mL); v_0 为空白滴定用去 FeSO₄ 体积(mL); v 为样品滴定用去 FeSO₄ 体积(mL);3.0 为 1/4 碳原子的摩尔质量(g/mol);1.1 为氧化校正系数; m 为风干土样质量(g); k 为将风干土样换算成烘干土的系数。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件进行数据整理,用 SPSS 23 软件中并采用 Duncan 检验进行多重比较,采用 Spearman 法进行双变量相关性分析,并对相关性进行显著性检验。用 CANOCO 4.5 进行典型相关分析(CCA)。

2 结果与分析

2.1 植物根系特性

由图 1 可知,植物根系主要以细根(直径<2 mm)为主,在整个土壤剖面中细根根长占比均>60%,白羊草和苔草则全为细根。芨蒿、铁杆蒿细根占比随土层深度增加呈增加的趋势;狼牙刺细根占比随土层深度增加先减少后增加;在各土壤层次中柠条细根根长占比变化不大,但是比例很高,为 90.7%~96.0%。

根长密度是根系在土壤中稠密层度的指标。由图 2 可知,农地根系根长密度显著少于其余各样地($P<0.05$)。柠条根长密度波动减小,其余物种根长密度随土壤剖面逐渐减小,白羊草、苔草由表层到次表层,根长密度急剧减少,白羊草、苔草 0—10 cm 根长密度分别是 10—50 cm 的 4.19,21.87 倍,说明白羊草、苔草根系表聚现象明显。

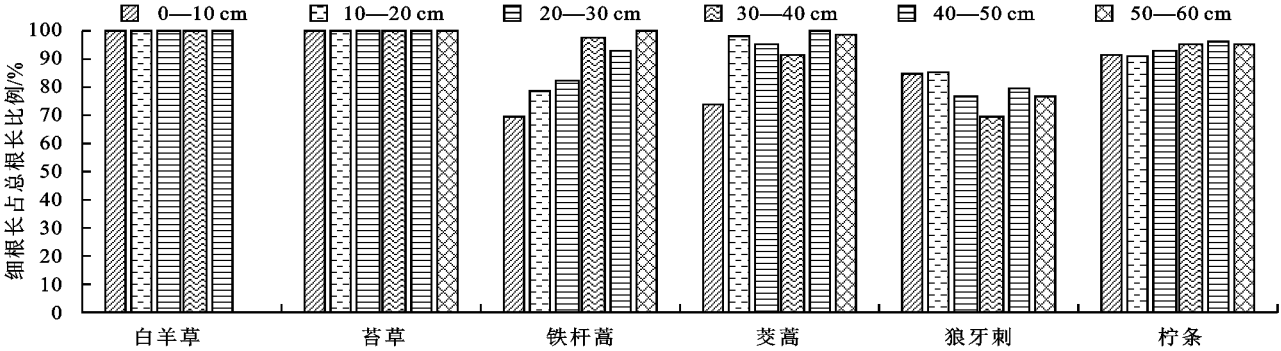
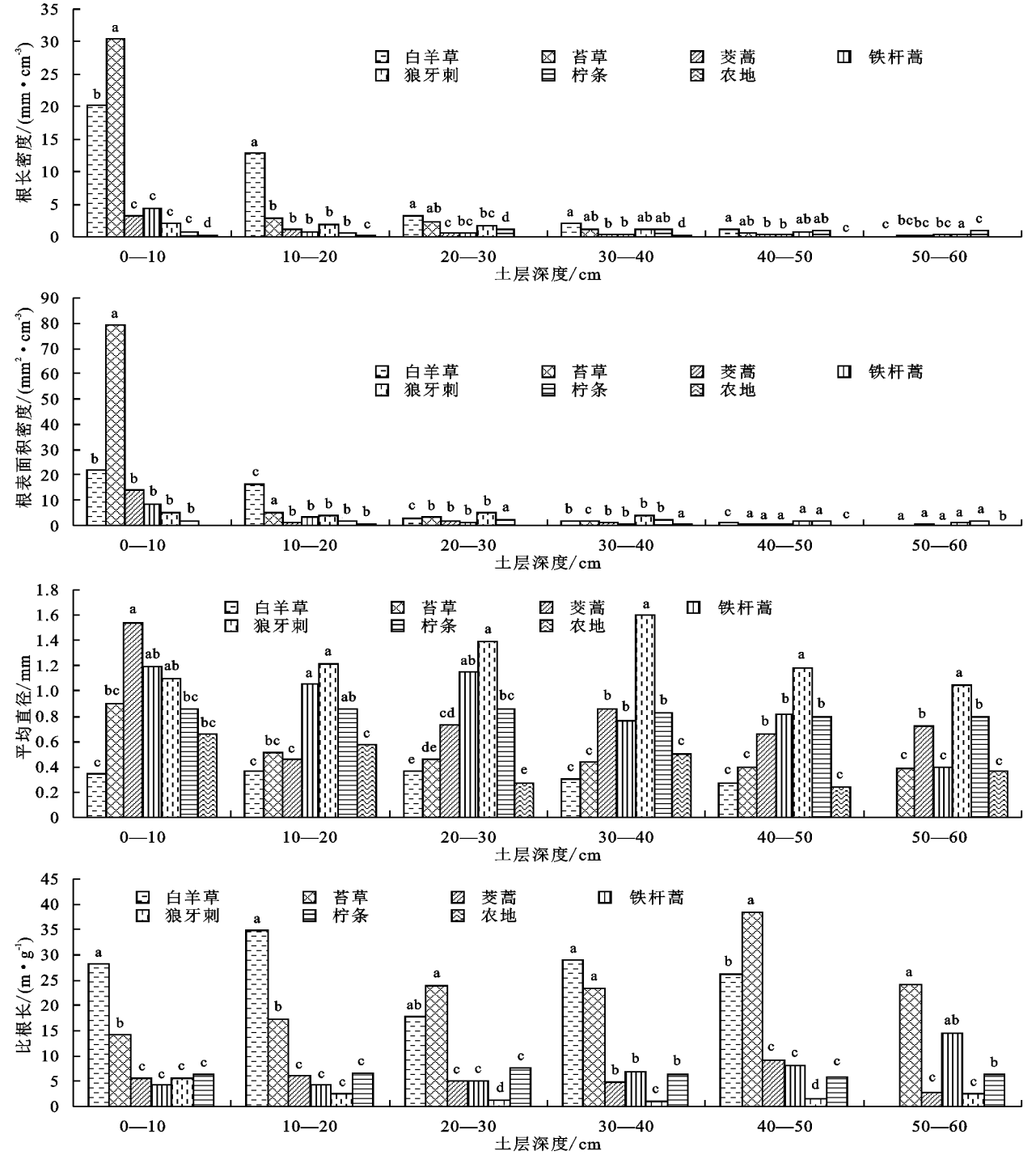


图 1 植物细根长占总根长比例随土壤深度的变化



注:不同小写字母表示同一土层不同物种差异显著($P<0.05$)。

图 2 不同物种根系特征垂直变化

表层 0—10 cm 苔草根系表面积密度显著大于其余物种($P<0.05$),达 $79.5\text{ mm}^2/\text{cm}^3$;10—20 cm 白羊草根系表面积密度显著大于其余物种($P<0.05$);20—40 cm 狼牙刺根系表面积密度显著大于其余物种,而根长密度与其余物种无显著差异($P>0.05$),且细根占比相对其余物种较小,说明狼牙刺细根与粗根分配较均匀。农地根长密度和根表面积均显著小于典型物种,而平均根直径与草本根系直径相似,说明农地仍然存在少量细根。

草本比根长均显著较大,说明草本根系生物量累计率较小。狼牙刺比根长显著小于其余物种,说明狼牙刺生物量累计率较显著。白羊草根系平均直径最大 0.37 mm,所有试验物种中白羊草的根最细。由图 2 可知,由草本、半灌木到灌木各层根直径呈增大的趋势。

表层苔草根系生物量最大,达 $2\,137.5\text{ g}/\text{m}^3$,是柠条根系生物量的 17.07 倍。除了狼牙刺、柠条,其余物种根系生物量随土层深度增加而减少。狼牙刺生物量先增加后减少,且除了表层 0—10 cm,狼牙刺剖面上生物量均显著大于其余物种($P<0.05$)(图 3)。

2.2 土壤有机质和容重在剖面上的变化特征

土壤表层 SOM 在各样地均最大,且都随着土层深度的增加而减小(图 4)。在 0—10 cm 土层内,土壤有机质含量分别为苔草($15.12\text{ g}/\text{kg}$)、茭蒿(13.89

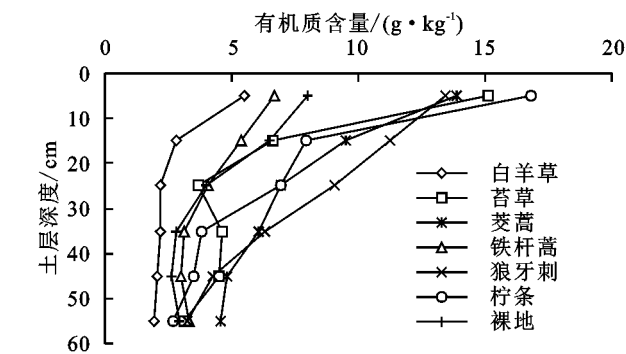


图 4 不同植物剖面土壤有机质、容重变化

随着土壤剖面深度的增加,土壤容重变大^[19-20]。本研究除了农地外,其余土壤容重整体随着土层深度增加而增加(图 4)。农地相对稳定,土壤容重为 $1.36\sim1.24\text{ g}/\text{cm}^3$ 。从图 4 可以看出,除了白羊草土壤容重较大外,其余基本小于农地,说明根系具有改善土壤结构的作用,草本植被苔草、白羊草下土壤容重均比其余 4 个物种大,这可能与白羊草分布坡面的土壤特性有关,白羊草分布于较陡的阳坡,土壤侵蚀强烈,土壤干旱贫瘠,有机质含量低,对土壤物理结构改善作用相对较小。其中柠条样地土壤容重变化最大,为 $0.88\sim1.29\text{ g}/\text{cm}^3$,这是因为柠条种植密度较大,地上部分生长旺盛,枯落物较多,枯落物分解进入土壤,大大降低了表层土壤的容

重。铁杆蒿($6.69\text{ g}/\text{kg}$)、柠条($16.84\text{ g}/\text{kg}$)、狼牙刺($16.84\text{ g}/\text{kg}$),明显大于白羊草($5.47\text{ g}/\text{kg}$)和裸地($8.02\text{ g}/\text{kg}$),到 10—20 cm 突然减少,这与表层有大量枯枝落叶有关。苔草与白羊草相比,在土壤剖面上苔草 SOM 明显多于白羊草,这与苔草生长环境有关,苔草一般生长在阴坡,水热条件相对较好,土壤会接收到更多的养分。SOM 表现为铁杆蒿 $<$ 茭蒿,10—60 cm 除了苔草,其余 SOM 均逐渐下降,苔草在 50—60 cm 最小,为 $3.13\text{ g}/\text{kg}$,在 20—30 cm 有 1 个低点,为 $3.69\text{ g}/\text{kg}$ 。50—60 cm 苔草、柠条和裸地 SOM 变化规律相似。

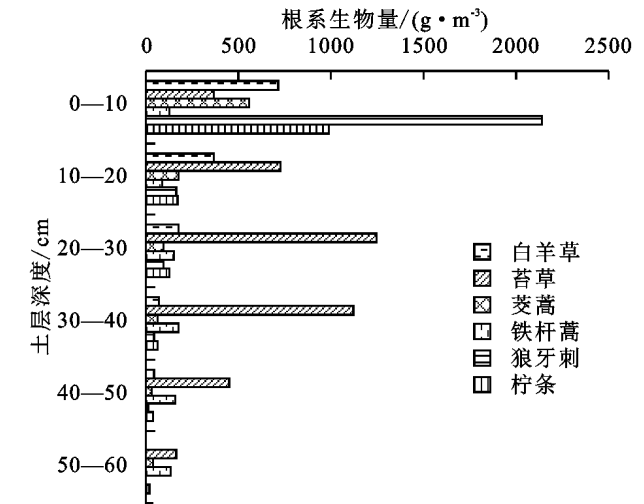
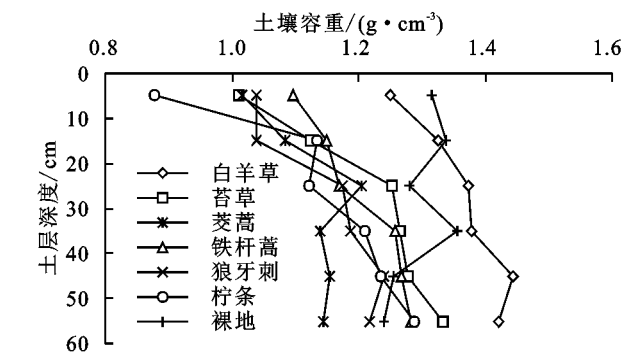


图 3 不同植物根系生物量垂直分布



重。铁杆蒿、茭蒿、狼牙刺样地土壤容重变化相近,前 4 层容重小于农地,后 2 层与农地相近。说明根系改善了土壤结构,根系密度起着关键作用。

2.3 不同物种团聚体在剖面上的变化

土壤团聚体作为土壤结构和功能最基本的单元,一般可以划分为大团聚体($0.25\sim10\text{ mm}$)和微团聚体($<0.25\text{ mm}$)。由图 5 可知,不同植物冠层下水稳性团聚体主要以 $\geq 2\text{ mm}$ 团聚体或 $<0.106\text{ mm}$ 小颗粒占优。农地大团聚体明显少于其他样地。第 1 层平均重量直径(MWD)相对较小,是由于表层枯枝落叶分解,土壤疏松, $>0.25\text{ mm}$ 团聚体较少,10 cm 土层以下,MWD 呈下降趋势(图 5)。白羊草和苔草团聚体

含量变化相似, 白羊草和苔草在剖面上 ≥ 2 mm 团聚体所占比例整体逐渐减少, 最多为 10—20 cm 土层, 分别占 70.0%和 44.7%; 茭蒿和铁杆蒿在剖面上变化相差较大, 铁杆蒿大团聚体明显少于茭蒿, 铁杆蒿大团聚体占

6.5%~49.9%, 茭蒿大团聚体占 55.3%~75.8%, 0.106~2 mm 团聚体相差不大。铁杆蒿 MWD 最大在 10—20 cm (1.56 mm), 最小仅 0.14 mm, 茭蒿 MWD 最大 2.23 mm, 同样是 10—20 cm。

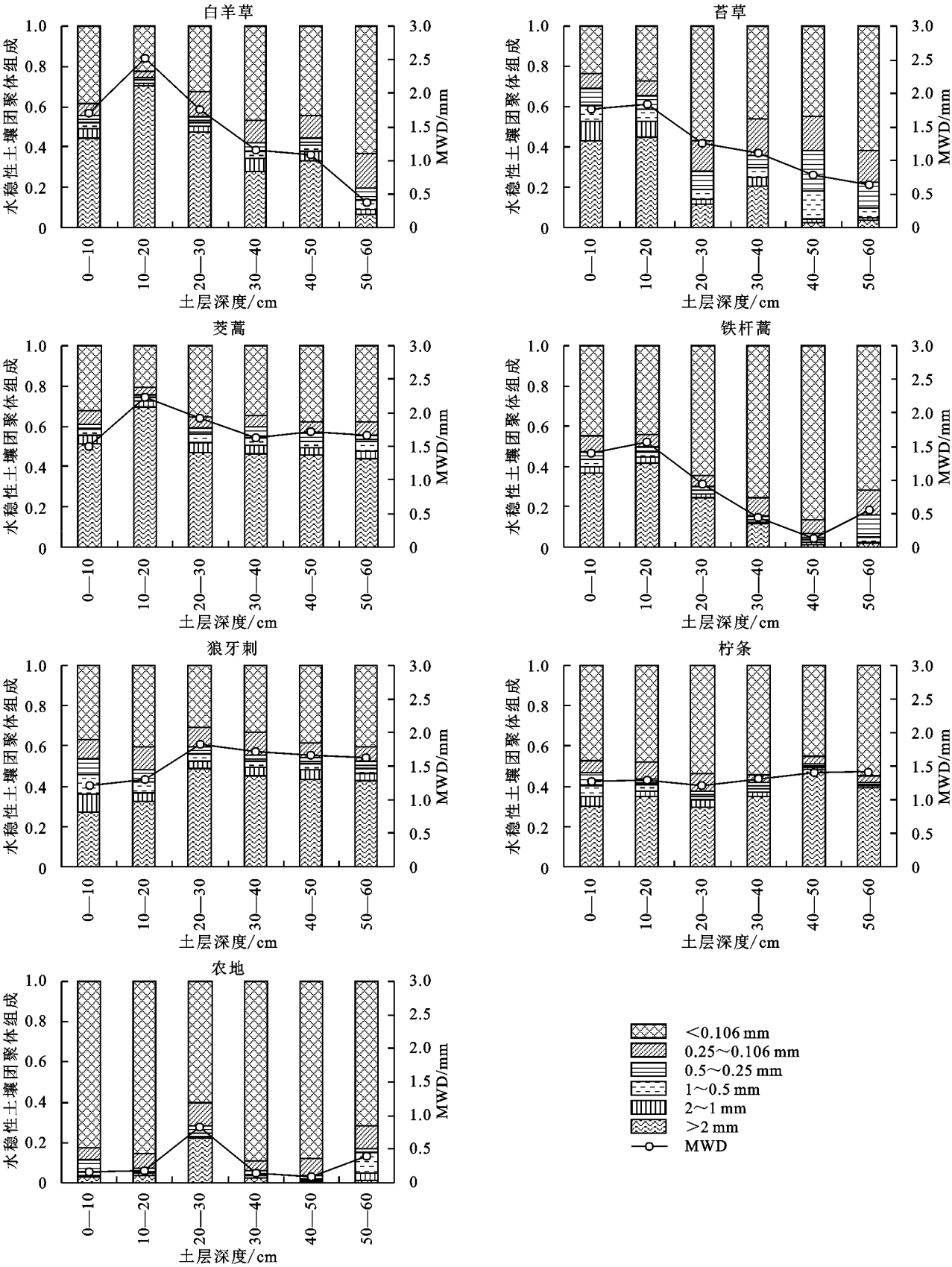


图 5 不同物种剖面水稳性团聚体分布特征及 MWD 变化

狼牙刺和柠条在剖面上变化不大,狼牙刺 ≥ 2 mm 团聚体先增加后减少,柠条在剖面上变化不大。狼牙刺大团聚体含量为 59.5%~53.4%,柠条为 50.9%~37.8%。狼牙刺 0—10 cm MWD(1.21 mm)略小于柠条(1.27 mm),其余剖面上狼牙刺 MWD 均比柠条大,狼牙刺 0.106~2 mm 团聚体也明显多余柠条,说明狼牙刺土壤稳定性更好。农地大团聚体较少,最大在 20—30 cm,占 22%,0—20 cm 土层大团聚体最少,可能是因为耕作的影响,扰动土壤,使土壤团粒减少,在 40—50 cm,仅为 0.72%。

2.4 根系特征与土壤理化性质的作用关系

根系特征均与土壤有机质显著相关(Monte Carlo test $P=0.002<0.01$),尤其是与根长、根表面积相关性更密切(图 6)。同时根系特征与 MWD 呈正相关,土壤容重与根系特性呈负相关,说明植物根系改善了土壤结构,土壤稳定性提高。平均直径与 >1 mm 大团粒团聚体呈正相关。比根长与小粒径、土壤容重呈正相关,说明根系物质累积不利于土壤稳定。

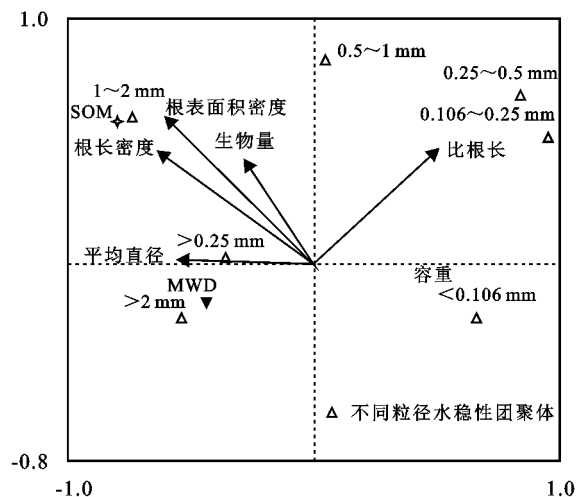


图 6 根系与土壤理化性质之间典型相关分析

3 讨论

黄土丘陵区不同恢复阶段植物根系特征不尽相同,本研究中,草本植物根系表聚现象最明显,且主要为 <2 mm 细根,细根占比达 99%以上,说明植物细根在群落演替以及土壤结构变化中具有重要作用^[21]。在黄土高原地区,水是限制植被生长的关键因素之一,大多数研究者^[22]认为,毛细根或拥有较大表面积比的细根可以有效提高获取土壤资源的能力,而有些学者^[23]则认为,粗根或老根则可以更好地保持植物取得的土壤水分和养分,本研究植物细根占比较大,这应该是黄土高原地区资源限制条件下植被适

应生境的策略之一。

对根系与有机质的关系研究^[24]发现,根系输入有机质的贡献多于地上部分,每年土壤 0—30 cm 有机碳储量增加 4%,本研究中苔草表层 SOM 大于白羊草,这与 2 种植物的生存环境有关,苔草生长在阴坡水分条件较好的坡下,植被盖度大,有利于土壤有机质积累,而白羊草处于阳坡,由于水分条件限制,植被盖度较低,且植物枯落物在强烈光照下,易光解,影响有机质累积^[23]。茭蒿样地 SOM 显著大于铁杆蒿样地,茭蒿样地处于平缓坡面,且植被盖度达 70%,而铁杆蒿植被盖度只有 40%,不利于有机质累积,因此在相似根系分布特征下,SOM 的含量受到其他环境因子的影响也较大。灌木柠条、狼牙刺样地 SOM 显著大于草本植物样地,说明随着退耕年限的增加,土壤有机质积累增加。根系对于有机碳的贡献率高于地上部分的枯枝落叶,不同植物根系对土壤的理化性质影响有一定差异,并不是简单的线性关系。

土壤团聚体稳定性被认为是侵蚀生态系统恢复状态的良好指标^[25],且以 MWD 度量土壤稳定性。6 个植物样地 MWD 均显著大于农地,说明植被对土壤稳定性作用显著。已有学者^[26]对土壤团聚体的水稳性与 SOM 含量之间的研究表明,SOM 能够增加对水稳定性的团聚体,提高 MWD,水稳性大团聚体的形成主要依靠有机质的胶结作用。黄土丘陵区植被恢复不断改善土壤结构,土壤稳定性提高,土壤有机质也不断提高^[14],本文中退耕年限较长的灌木狼牙刺和柠条,具有较高的土壤有机质,同时土壤稳定性也较高。狼牙刺和茭蒿大团聚体在剖面上的变化不大,但是 SOM 在剖面上减少,到 50—60 cm 不同样地基本相同,而灌木的根系较深,根系也比草本多,说明根系对下层团聚体的影响也很显著。Carrie 等^[27]研究 SOM、根系、真菌菌丝、黏土等因素的影响时,没有发现哪一个因素对土壤起着主导作用,目前土壤对于 SOM 维持机制还不明确^[28]。

研究结果中虽然草本植物根系密度较大,但是水稳性团聚体含量相对其余物种较小,其原因是由于根系对水稳定性团聚体的形成是一个长期的过程,根系对土壤抗蚀性的改善作用虽然在短时间内不明显,但是随着时间地推移,其效果会越来越明显^[29],这也解释了灌木剖面水稳性团聚体比较稳定的原因,因为退耕地灌木植被恢复时间更长。

4 结 论

本研究各物种的根系主要集中在土壤表层 0—30 cm,且降低最快,随后缓慢降低。柠条、狼牙刺根系相对较粗。与裸地相比,草本、半灌木到灌木,0—60 cm 土层中水稳性团聚体均明显增加,且在各土层中趋于稳定,整个剖面土壤抗蚀性提高;茭蒿群落土壤稳定性最好。根长密度、根表面积密度、平均直径以及生物量与土壤大团聚体、SOM、MWD 呈正相关关系;土壤根系改善土壤结构,增加土壤稳定性,进而提高土壤抗蚀性。根系的表聚现象在本文中的草本以及半灌木也有明显体现。与裸地相比,由草本、半灌木到灌木,0—60 cm 土层中水稳性团聚体均明显增加,且在各土层中趋于稳定,整个剖面土壤抗蚀性提高。总之,根系能够提高土壤有机质含量,增加了中等粒径团聚体含量,改善土壤结构,提高土壤稳定性,对增加土壤抗蚀性起到重要作用。

参考文献:

- [1] 邱扬,傅伯杰,王勇.土壤侵蚀时空变异及其与环境因子的时空关系[J].水土保持学报,2002,16(1):108-111.
- [2] 刘国彬,王国梁,上官周平,等.黄土高原地区水土保持科学研究的重点领域[J].中国水土保持,2008(12):37-39,72.
- [3] Chen N, Ma T Y, Zhang X P. Responses of soil erosion processes to land cover changes in the Loess Plateau of China: A case study on the Beiluo River basin [J]. Catena, 2016,136:118-127.
- [4] Wang Z J, Jiao J Y, Rayburg S, et al. Soil erosion resistance of “Grain for Green” vegetation types under extreme rainfall conditions on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2016,141:109-116.
- [5] Zhang B J, Zhang G H, Yang H Y, et al. Soil erodibility affected by vegetation restoration on steep gully slopes on the Loess Plateau of China [J]. Soil Research, 2018,56,712-723.
- [6] 李鹏,赵忠,李占斌,等.植被根系与生态环境相互作用机制研究进展[J].西北林学院学报,2002,17(2):26-32.
- [7] 罗永清,赵学勇,王涛,等.植物根系分解及其对生物和非生物因素的响应机理研究进展[J].草业学报,2017,26(2):197-207.
- [8] 蒋定生,范兴科,李新华,等.黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J].水土保持学报,1995,9(2):1-8.
- [9] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003,17(3):34-37.
- [10] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure [J]. New Phytologist, 2006, 171(1):41-53.
- [11] 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.
- [12] 张彦军.复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献[J].环境科学,2019,40(2):961-968.
- [13] Ktterer T, Bolinder M A, Andrén O, et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011,141(1/2):184-192.
- [14] 吕渡,杨亚辉,赵文慧,等.不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系[J].生态学报,2018,38(11):3979-3987.
- [15] 吴彦,刘世全,付秀琴,等.植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(1):46-50.
- [16] Ma Z Y, Liu H Y, Mi Z R, et al. Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production [J]. Nature Communications, 2017,8(8):e15378.
- [17] Yoder R E. A direct, method of aggregate, analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses [J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1936,28(5): 337-351.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:农业出版社,1990:30-34.
- [19] 李裕元,邵明安,陈洪松,等.水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J].生态学报,2010,30(16):4306-4316.
- [20] 李萍,张波,李同录.黄土高原边坡特征与破坏规律的分区研究[J].地球科学与环境学报,2012,34(3):89-98.
- [21] 由政,姚旭,景航,等.不同演替阶段群落根系分布与土壤团聚体特征的协同变化[J].水土保持研究,2016,23(6):20-31.
- [22] Kris R, Kramer W, Peter J, et al. Root traits are multidimensional: Specific root length is independent from root tissue density and the plant economic spectrum [J]. Journal of Ecology 2016,104(1):1299-1310.
- [23] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等.黄土丘陵沟壑区县域土壤有机质空间分布特征及预测[J].地理科学进展,2006,25(2):112-122,142.

[24] Ghafoor A, Poeplau C, Thomas K. Fate of straw-and root-derived carbon in a Swedish agricultural soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*,2017,53(2):257-267.

[25] Burri K, Graf F, Böll A, et al. Revegetation measures improve soil aggregate stability: A case study of a landslide area in Central Switzerland [J]. *Forest Snow and Landscape Research*,2009, 82(1):45-60.

[26] Demenois J, Carriconde F, Bonaventure P, et al. Impact of plant root functional traits and associated mycorrhizas on the aggregate stability of a tropical Ferral-sol [J]. *Geoderma*,2018,312(1):6-16.

[27] Carrie A, Haydu H, Robert C, et al. Soil aggregate stability under chaparral species in southern California [J]. *Geoderma*,2018,310:201-208.

[28] Vincent P, Catherine R, Alison D. et al. The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes [J]. *Soil Biology and Biochemis-try*,2018,120:246-259.

[29] Samuel A, Safya M, Claire C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability-A literature analysis [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(1):1-12.

(上接第 98 页)

[10] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.模拟降雨下喀斯特坡耕地土壤养分输出机制[J].*生态学报*,2017,38(2):624-634.

[11] Doan T T, Henry-des-Tureaux T, Rumpel C, et al. Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Viet-nam: A three year mesocosm experiment [J]. *Science of The Total Environment*,2015,514:147-154.

[12] 吴媛媛,杨明义,张凤宝,等.添加生物炭对黄绵土耕层土壤可蚀性的影响[J].*土壤学报*,2015,53(1):81-92.

[13] 薛文强,周蓓蓓,毛通,等.纳米碳混合层对土壤水分入渗特性及水分分布影响[J].*水土保持学报*,2018, 32(3):152-159.

[14] 安瞳昕,周锋,吴珍珍,等.坡耕地间作作物群体水土保持耕作措施[J].*水土保持研究*,2019,26(2):17-22.

[15] 刘艳丽,周蓓蓓,王全九,等.纳米碳对黄绵土水分运动及溶质迁移特征的影响[J].*水土保持学报*, 2015,29(1):21-25.

[16] 周蓓蓓,陈晓鹏,吕金榜,等.纳米碳对不同植被覆盖下黄土坡地降雨侵蚀的抑制效果[J].*农业工程学报*, 2017,33(2):116-124.

[17] Boehler M, Zwickenpflug B, Hollender J, et al. Re-moval of micropollutants in municipal waste water treatment plants by powder-activated carbon [J]. *Wa-ter Science & Technology*,2012,66(10):2115-2121.

[18] 白致威,段兴武,丁剑宏,等.土壤有效含水量的经验估 算模型:以黑土为例[J].*中国农学通报*,2015,31(20): 153-159.

[19] 兰亚琼,刘锐,马正杰,等.臭氧—生物活性炭对微污染 原水中典型持久性有机物的去除效果[J].*环境科学*, 2018, 39(12):5541-5549.

[20] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤 水分入渗与蒸发的影响[J].*农业工程学报*,2016,32(14):135-144.

[21] 方圆,冯浩,操信春,等.活性炭对土壤入渗、蒸发特性 及养分淋溶损失的影响[J].*水土保持学报*,2011,25(6):23-26.

[22] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进 展[J]. *水土保持学报*,2018,32(2):1-10.