

DOI: 10.5846/stxb202111183242

樊子豪,张瑞香,冯雪琦,马瑞婧,郭二辉.河滨湿地不同植物群落根系分布特征与土壤理化性状的关系——以黄河中游荥阳段为例.生态学报, 2023,43(11):4772-4781.

Fan Z H, Zhang R X, Feng X Q, Ma R J, Guo E H. Characteristics of root distribution and soil physical and chemical properties of different vegetation communities in tidal flat wetland: a case study of Xingyang section of Zhengzhou in the middle reaches of the Yellow River. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (11): 4772-4781.

# 河滨湿地不同植物群落根系分布特征与土壤理化性状的关系

——以黄河中游荥阳段为例

樊子豪,张瑞香,冯雪琦,马瑞婧,郭二辉\*

河南农业大学林学院, 郑州 450002

**摘要:**在黄河中游郑州荥阳段,选择了 5 种河滨湿地植物群落进行根系和土壤性状特征研究,以期阐明不同植物群落的根系分布规律与土壤性状的关系,为河滨湿地植物群落组成以及土壤质量恢复提供科学参考。结果表明(1)在 0—40 cm 土层,根生物量密度与根长密度的平均值均表现为:芦苇群落(*Phragmites australis*)和芦苇-狗牙根(*Cynodon dactylon*)群落均大于芦苇-拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)-狗牙根群落、拂子茅-狗牙根群落、拂子茅-狗牙根-水莎草(*Juncellus serotinus*)群落。拂子茅-狗牙根、芦苇-拂子茅-狗牙根、拂子茅-水莎草-狗牙根三种植物群落类型下根生物量密度、根长密度在 0—20 cm 表层土壤较大,芦苇群落和芦苇-狗牙根群落的根生物量密度、根长密度在 10—40 cm 的土层较大。(2)黄河河滨湿地芦苇群落、芦苇-狗牙根群落的土壤以粉粒为主,拂子茅-狗牙根群落、芦苇-拂子茅-狗牙根群落、拂子茅-狗牙根-水莎草群落的土壤主要以砂粒为主。在 0—40 cm 土层,芦苇群落、芦苇-狗牙根群落的土壤含水率、土壤有机质、有效氮和有效磷含量均显著高于芦苇-拂子茅-狗牙根、拂子茅-狗牙根、拂子茅-狗牙根-水莎草群落。(3)黄河河滨湿地植物群落的根生物量密度、根长密度均与土壤黏粒含量、粉粒含量、土壤含水率、有效氮显著正相关( $P<0.05$ ),与土壤砂粒呈极显著负相关( $P<0.01$ )。

**关键词:**河滨湿地;植物群落;根系分布特征;土壤理化性质

## Characteristics of root distribution and soil physical and chemical properties of different vegetation communities in tidal flat wetland: a case study of Xingyang section of Zhengzhou in the middle reaches of the Yellow River

FAN Zihao, ZHANG Ruixiang, FENG Xueqi, MA Ruijing, GUO Erhui\*

College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

**Abstract:** In this paper, five riparian zone vegetation types were selected in the middle reaches of the Yellow River in Zhengzhou Xingyang to study the roots and soil properties in order to elucidate the relationship between the root distribution patterns and soil properties in different vegetation types, to provide scientific reference on plant community composition and soil quality restoration in riparian zones. The results showed that: (1) In the 0—40 cm soil layer, the mean root biomass density and the mean root length density were greater in the *Phragmites australis* community and the *Phragmites australis*-*Cynodon dactylon* community than in the *Phragmites australis*-*Calamagrostis epigeios*-*Cynodon dactylon* community, the *Calamagrostis epigeios*-*Cynodon dactylon* community and the *Calamagrostis epigeios*-*Cynodon dactylon*-*Juncellus serotinus*

基金项目:河南省青年人才托举工程项目(2019HYTP013);国家自然科学基金青年项目(41401206)

收稿日期:2021-11-18; 网络出版日期:2023-02-07

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoerhui@126.com

community. The distribution of root biomass density in the *Phragmites australis* community and *Phragmites australis*-*Cynodon dactylon* community was mainly distributed in the soil layer of 10—40 cm. (2) in the Yellow River tidal flat wetland, the soil of the *Phragmites australis* community and the *Phragmites australis*-*Cynodon dactylon* community are mainly silty grains. The soil of the *Calamagrostis epigeios*-*Cynodon dactylon* community, *Phragmites australis* -*Calamagrostis epigeios*-*Cynodon dactylon* community, and the *Calamagrostis epigeios*-*Cynodon dactylon*-*Juncellus serotinus* community are mainly sand grains. In the 0—40 cm soil layer, the soil moisture content, soil organic matter, available nitrogen, and available phosphorus content of the *Phragmites australis* community and the *Phragmites australis*-*Cynodon dactylon* community are significantly higher than *Calamagrostis epigeio*-*Cynodon dactylon* community, *Phragmites australis*-*Calamagrostis epigeio*-*Cynodon dactylon* community. (3) The root biomass density and root length density of plant communities in the Yellow River riparian zone were significantly positively correlated with soil clay content, silt content, soil moisture content, and available nitrogen ( $P<0.05$ ), which were extremely significantly negatively correlated with soil sand content ( $P<0.01$ ).

**Key Words:** riparian zone wetland; plant community; characteristics of root distribution; soil physical and chemical properties

河滨湿地是指从水-陆交界处至河水影响消失的地带,是一个敏感和脆弱的生态区域,具有明显的边缘效应和独特的生态过程,也是全球生物地球化学循环和生态恢复的热点区域<sup>[1-4]</sup>。河滨湿地植被与土壤是河滨湿地生态功能与生态健康维持的关键因素,根系作为土壤与植物地上部分之间物质、能量流动与信号传导的关键纽带,在保持水土、涵养水源、养分循环以及降解污染物等方面具有重要的生态功能<sup>[5-6]</sup>。国外有学者提出以根密度、根生物量来表征根系在土壤中的分布情况及其与土壤性质的关系<sup>[7-8]</sup>。根系的生态功能主要取决于其的分布、数量、形态等,而相应的根系特征又受到植物类型、群落结构、立地条件 and 环境因素等的影响<sup>[9-10]</sup>。相关研究表明不同森林类型下根长密度与根系生物量对土壤性状呈现显著性相关,根系结构特征的差异影响了土壤结构的改善能力<sup>[11-12]</sup>,对土壤物理性质也存在一定的互馈效应<sup>[13]</sup>,根系活动也会影响土壤的养分积累<sup>[14]</sup>。国内有关研究主要从植被类型、群落演替与恢复阶段等方面研究植被根系分布与土壤理化性质的影响机制<sup>[12,15-17]</sup>。植被与土壤是河滨湿地的基本组成要素,植被根系是土壤与植物地上部分之间物质循环与能量流动的关键纽带。植物地下根系的组成、深度和密度深刻影响着土壤养分的累积、迁移和转化,因而河滨湿地植物根系特征与土壤性状的研究具有重要意义。

黄河中游河滨湿地对于维护河流生态系统的健康与区域生态安全具有极其重要的作用<sup>[18-19]</sup>。根据沿河样地调查发现以研究区主要以芦苇(*Phragmites australis*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)、水莎草(*Juncellus serotinus*)等植物为群落优势种。本研究位于黄河中游郑州荥阳段,选择了5种河滨湿地植物群落类型进行根系和土壤性状特征研究,分析了不同群落类型的根长密度、根生物量、平均直径和土壤理化性质,以期阐明不同群落类型下植物根系分布规律与土壤性状的关系,为河滨湿地群落组成以及土壤性质特征提供详细全面的认知和科学参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于河南省荥阳市王村镇的黄河河滨湿地,属暖温带大陆性季风气候,四季分明,年均气温 15.6℃,年均降雨量为 542.15 mm<sup>[20]</sup>(图 1),平均海拔 80 m。该研究区受人类活动干扰较轻,研究区优势种为芦苇、狗牙根、拂子茅、水莎草等。在垂直于河流约 30 m 处设置一个平行于河流的水平样带,在样带中选择 5 种具有代表性的植被群落类型:芦苇群落(P)、芦苇-狗牙根群落(P-C)、芦苇-狗牙根-拂子茅群落(P-C-C)、拂子茅-狗牙根群落(C-C)、拂子茅-狗牙根-水莎草群落(C-C-J)。5个标准样地均设置为 10 m×10 m,每一标准样地沿对角线取 3 个 1 m×1 m 的小样地。用全球定位系统(GPS)定位,记录样地编号、经纬度、及植物的种名、平均

高度等,样地基本情况见表 1。

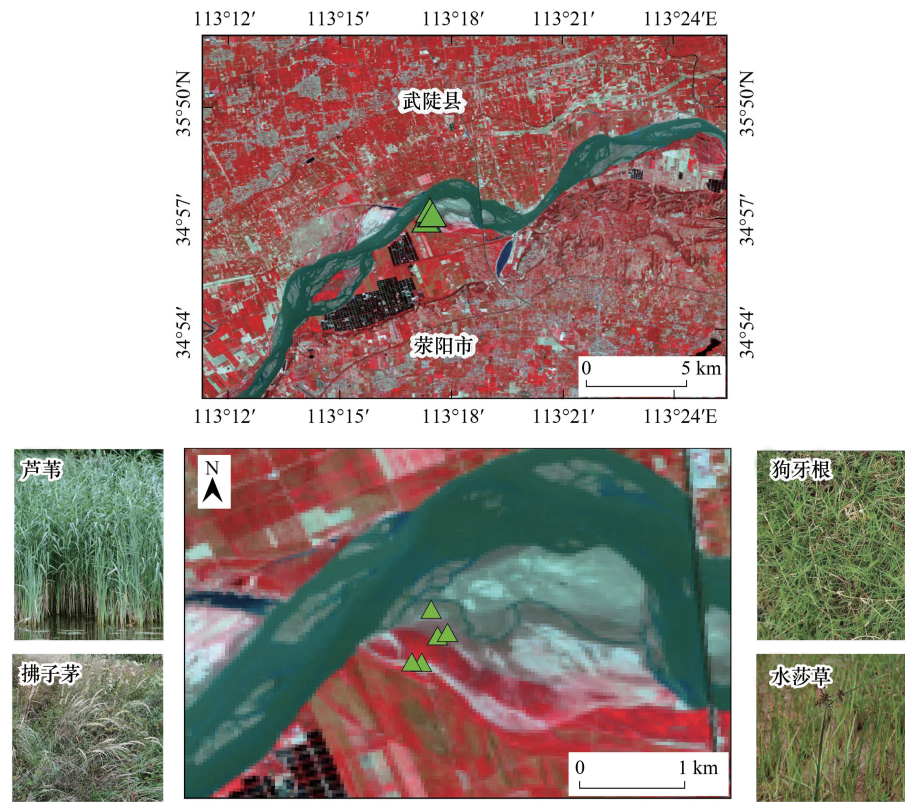


图 1 研究区地理位置及采样点分布

Fig.1 Geographical location of the study area and distribution of sampling points

表 1 各样方的基本情况

Table 1 The basic situation of each sample

| 群落类型<br>Community types                                                           | 经纬度<br>Longitude and latitude | 平均海拔<br>Average altitude/m | 样地情况描述<br>Descriptions of experimental plots                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 芦苇<br><i>Phragmites australis</i>                                                 | N 34°56'59"<br>E 113°17'22"   | 80                         | 芦苇平均株高为 2.26 m, 盖度为 100%                                                              |
| 芦苇-狗牙根<br><i>Phragmites australis-Cynodon dactylon</i>                            | N 34°56'59"<br>E 113°17'21"   | 81                         | 芦苇平均株高 2.16 m, 狗牙根平均株高 0.27 m, 芦苇的盖度为 70%, 狗牙根的盖度为 30%。                               |
| 拂子茅-狗牙根<br><i>Calamagrostis epigeios-Cynodon dactylon</i>                         | N 34°57'7"<br>E 113°17'27"    | 80.4                       | 拂子茅平均株高 1.2 m, 狗牙根平均株高 0.21 m, 拂子茅的盖度为 70%, 狗牙根的盖度为 30%。                              |
| 芦苇-拂子茅-狗牙根<br><i>Phragmites australis-Cynodon dactylon-Cynodon dactylon.</i>      | N 34°57'15"<br>E 113°17'25"   | 81.2                       | 芦苇平均株高 1.58 m, 拂子茅平均株高 1.43 m, 狗牙根平均株高 0.36 m。芦苇的盖度为 40%, 拂子茅的盖度为 30%, 狗牙根的盖度为 30%。   |
| 拂子茅-狗牙根-水莎草<br><i>Calamagrostis epigeios-Cynodon dactylon-Juncellus serotinus</i> | N 34°57'8"<br>E 113°17'30"    | 80.7                       | 拂子茅平均株高 0.78 m, 狗牙根平均株高 0.23 m, 水莎草平均株高 0.38 m。拂子茅的盖度为 40%, 狗牙根的盖度为 30%, 水莎草的盖度为 30%。 |

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

采用环刀法在样方中心按 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm 分层采集土壤样品并称鲜重。用土钻分层采集样方内对角及中心 5 个点的土壤样品,混合成一个混合样,检出枯落物和根,自然风干,过筛后保存,用于测

定土壤理化性质。根系采集于 2020 年 10 月进行。根系采集采用土块法<sup>[21]</sup>,在每个样地使用对角线法选择 3 个 1 m×1 m 的样点,每个样点选取植被盖度均匀 25 cm×25 cm 的小样方,各样点分 3 层(0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm),将土壤分层采集装入密封袋内带回,根样取回后在水中浸泡冲洗,用网勺和镊子将根系挑出,并提出死根。

### 1.2.2 土壤指标测定

土壤机械组成利用 Mater Sizer 2000 激光颗粒分析仪测定并按国际制分为黏粒(0<0.002 mm)、粉粒(0.002—0.02 mm)、砂粒(0.02—2 mm)。土壤含水率采用烘干法测定。土壤容重采用环刀法测定。土壤有机质(SOM)含量采用重铬酸钾外加热法测定;速效氮(AN)采用碱解扩散法测定;速效磷(AP)采用 NaHCO<sub>3</sub>-钼锑抗比色法测定<sup>[22]</sup>。

### 1.2.3 根系指标测定

用 WinRHIZO2005 根系分析仪对根系进行形态指标的测定,对平均直径与根系的根长密度进行分析与计算,根长密度为土块内根系长度/土块体积。之后将根系装在信封中在 70 ℃ 恒温烘干 48 h,获得根系生物量,并计算其根生物量密度,根生物量密度为土块内根系烘干重量/土块体积。

### 1.2.4 统计分析

使用 Excel 2003 进行数据整理,使用 SPSS 20.0 对数据进行分析。经过 Kolmogorov-Smirnov Test(K-S 检验)正态分布检验,数据符合正态分布。采用单因素方差分析对不同群落同一土层中根系特征指标与土壤理化性质间差异显著性进行分析,并使用多重比较(Tukey's HSD)方法进行多重比较,显著水平设置为  $\alpha=0.05$ ,并对根系特征指标和土壤性质进行相关性分析。利用 Origin 进行作图并增加显著性标记。

表 2 河滨湿地不同植物群落土壤性状特征

Table 2 Characteristics of soil properties of different plant communities in riparian zones

| 群落类型<br>Community<br>types | 根长密度<br>Root length density/<br>( cm/cm <sup>3</sup> ) | 根生物量密度<br>Root biomass<br>density/( mg/cm <sup>3</sup> ) | 平均直径<br>Average root<br>diameter/mm | 含水率<br>Water content/% | 容重<br>Bulk density/<br>( g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------|
| P                          | 1.81±0.21a                                             | 0.055±0.004a                                             | 0.45±0.02a                          | 34.38±2.4a             | 1.22±0.05b                                   |
| P-C                        | 1.84±0.21a                                             | 0.045±0.005b                                             | 0.54±0.01a                          | 30.51±3.2a             | 1.21±0.12b                                   |
| P-C-C                      | 1.20±0.12b                                             | 0.039±0.001b                                             | 0.48±0.04a                          | 22.87±1.11b            | 1.47±0.03a                                   |
| C-C                        | 1.32±0.35ab                                            | 0.018±0.002c                                             | 0.55±0.02a                          | 20.77±0.45b            | 1.43±0.02a                                   |
| C-C-J                      | 0.51±0.01c                                             | 0.017±0.004c                                             | 0.51±0.06a                          | 20.5±0.97b             | 1.45±0.02a                                   |

| 群落类型<br>Community<br>types | 黏粒<br>Clay/% | 粉粒<br>Silt/% | 砂粒<br>Sand/% | 有效磷<br>Available P/<br>( mg/kg) | 有机质<br>Organic matter/<br>( g/kg) | 有效氮<br>Available N/<br>( mg/kg) |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| P                          | 3.49±0.28a   | 83.16±2.55a  | 13.35±2.83b  | 13.05±0.03a                     | 18.80±3.01a                       | 12.24±0.52a                     |
| P-C                        | 3.20±0.24a   | 79.95±2.38a  | 16.85±2.56b  | 10.00±1.01a                     | 19.30±1.62b                       | 9.60±0.35b                      |
| P-C-C                      | 0.54±0.21b   | 28.71±6.47b  | 70.74±6.68a  | 3.03±0.53b                      | 7.41±0.26c                        | 3.50±1.17c                      |
| C-C                        | 0.06±0.06b   | 9.13±7.45b   | 90.82±7.52a  | 2.84±0.20b                      | 4.42±0.45d                        | 1.76±0.05c                      |
| C-C-J                      | 0.17±0.22b   | 15.69±18.68b | 84.07±19.02a | 2.85±0.29b                      | 5.38±0.45d                        | 2.00±0.25c                      |

不同小写字母表示河滨湿地不同植物群落土壤性状特征差异显著( $P<0.05$ ); P 代表芦苇群落、P-C 代表芦苇-狗牙根组合群落、C-C 代表拂子茅-狗牙根组合群落、P-C-C 代表芦苇-狗牙根-拂子茅组合群落、C-C-J 代表拂子茅-狗牙根-水莎草组合群落

## 2 结果与分析

### 2.1 河滨湿地不同植物群落根系结构特征

根生物量密度表示单位根系密度的生物量大小,是植物群落结构与功能的重要测度指标<sup>[23]</sup>。图 2 表明,在 0—10 cm 土层,各群落类型下细根生物量密度差异显著,分布规律为 P-C-C(0.0785 mg/cm<sup>3</sup>)> C-C(0.0433 mg/cm<sup>3</sup>)> C-C-J(0.038 mg/cm<sup>3</sup>)> P-C(0.0155 mg/cm<sup>3</sup>)> P(0.0025 mg/cm<sup>3</sup>)。在 10—20 cm 和 20—40 cm 土

层,P 与 P-C 群落类型下细根生物量密度明显增大,并且显著大于其他三种群落。

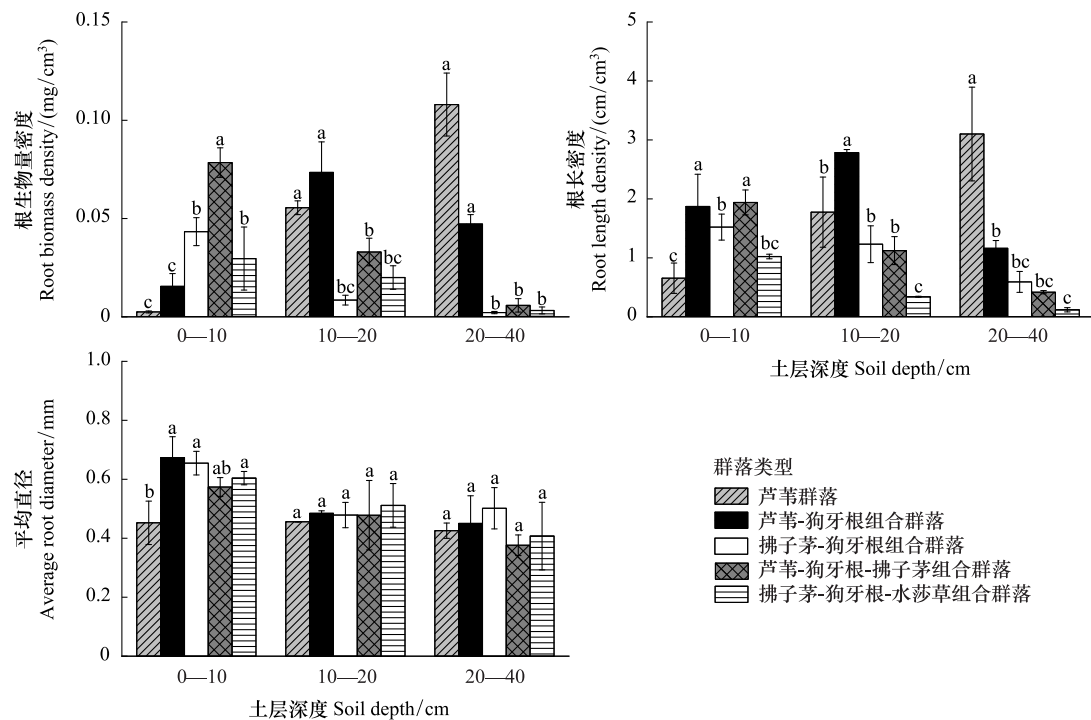


图2 不同典型群落类型的细根结构特征

Fig.2 The characteristics of fine root structure in different typical community types

不同小写字母表示在同一土层具有显著差异 ( $P < 0.05$ )

根长密度是单位土壤体积所含根系的长度,反映在某一土壤层的根系伸展量<sup>[24]</sup>。0—10 cm 土层,P 群落下根长密度最小,其值为  $0.6 \text{ cm/cm}^3$ 。P-C 与 P-C-C 根长密度差异不显著,但显著高于其余 3 种群落类型。在 10—20 cm 土层,P-C 群落根长密度最大,C-C-J 群落根长密度最小,其值分别为  $2.73 \text{ cm/cm}^3$ ,  $0.34 \text{ cm/cm}^3$ , P、C-C、P-C-C 三种群落下根长密度差异不显著。在 20—40 cm 土层,根长密度大小依次为  $P (3.1 \text{ cm/cm}^3) > P-C (1.163 \text{ cm/cm}^3) > C-C (0.593 \text{ cm/cm}^3) > P-C-C (0.418 \text{ cm/cm}^3) > C-C-J (0.12 \text{ cm/cm}^3)$ ,且 P 群落下根长密度显著高于其它群落类型。

图2表明,在 0—10 cm 土层,P 群落的根系平均直径较低,其余 4 种群落的根系平均直径均无显著性差异。在 10—20 cm 和 20—40 cm 土层,5 种群落的根系平均直径也均无显著性差异。在 0—40 cm 土层,P 群落下细根的根生物量密度和根长密度是随土壤深度增加呈递增趋势,P-C 群落下细根的根生物量密度和根长密度则是随土层深度增加先增加后减少,而 C-C、P-C-C、C-C-J 群落下细根分布结构随土层深度增加呈递减趋势。不同群落类型在 0—10 cm 土层中的根系平均直径整体略高于其余土层。

表2表明,在 0—40 cm 土层,根生物量密度平均值分布规律为  $P (0.055 \text{ mg/cm}^3) > P-C (0.045 \text{ mg/cm}^3) > P-C-C (0.039 \text{ mg/cm}^3) > C-C (0.018 \text{ mg/cm}^3) > C-C-J (0.017 \text{ mg/cm}^3)$ ;根长密度平均值分布规律为  $P-C (1.836 \text{ cm/cm}^3) > P (1.808 \text{ cm/cm}^3) > C-C (1.320 \text{ cm/cm}^3) > P-C-C (1.200 \text{ cm/cm}^3) > C-C-J (0.508 \text{ cm/cm}^3)$ ;平均直径分布规律为  $C-C (0.545 \text{ mm}) > P-C (0.536 \text{ mm}) > C-C-J (0.508 \text{ mm}) > P-C-C (0.476 \text{ mm}) > P (0.444 \text{ mm})$ 。

## 2.2 河滨湿地不同植物群落的土壤粒径分布特征

图3表明,黄河河滨湿地不同植物群落类型的粒径有较大的差异,P、P-C 植物群落类型下土壤以粉粒为主,C-C、P-C-C、C-C-J 植物群落类型土壤粒径主要为砂粒。在 0—40 cm 土层,各植物群落类型土壤黏粒质量分数均小于 4%,整体处于极低水平。表2表明,在 0—40 cm 土层,5 种群落类型的粉粒质量分数平均值分布

规律为: $P(83.15\%) > P-C(79.95\%) > P-C-C(28.71\%) > C-C-J(15.69\%) > C-C(9.12\%)$ ; 5 种群落类型的砂粒质量分数平均值分布规律为: $C-C(90.81\%) > C-C-J(84.06\%) > P-C-C(70.74\%) > P-C(16.84\%) > P(13.35\%)$ ;

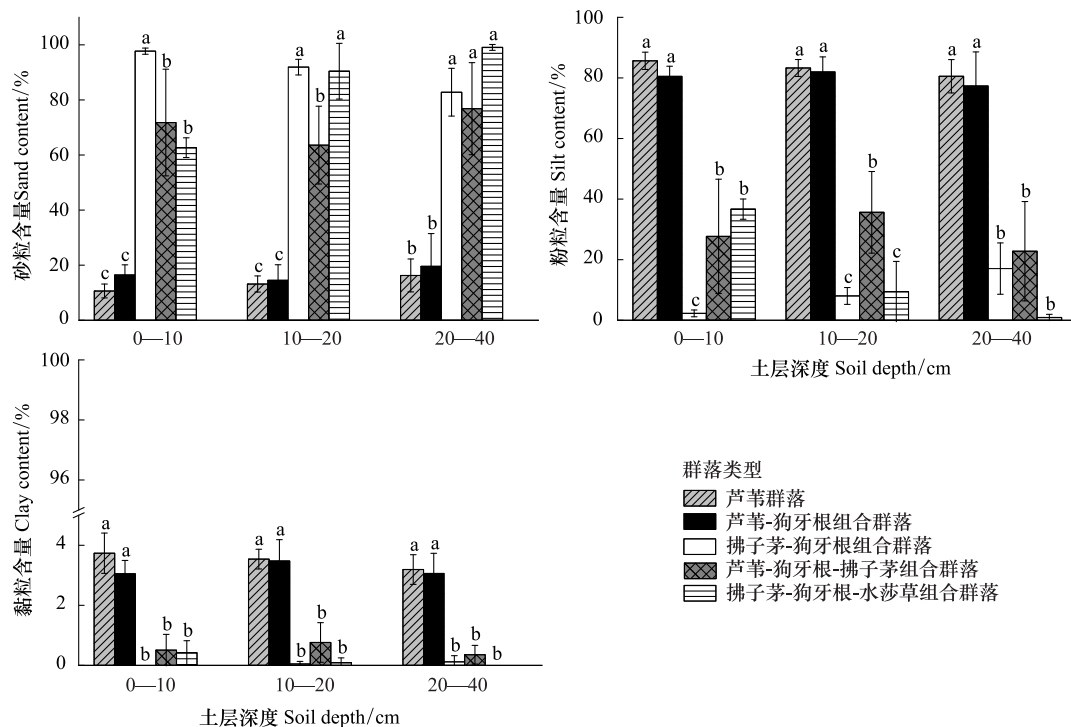


图3 不同典型群落类型的粒径结构特征

Fig.3 The characteristics of soil particle size structure and water content in different typical community types

### 2.3 河滨湿地不同植物群落土壤容重与含水率分布特征

如图4所示,在0—20 cm 土层,P 与 P-C 植物群落下土壤容重显著低于其余3种群落,20—40 cm 土层中5种群落下土壤容重无显著差异。在0—10 cm、10—20 cm 的土层中,P 与 P-C 群落类型的土壤含水量均显著高于其他3种群落类型。在20—40 cm 土层下,P 群落类型的土壤含水量最高,并均显著高于其他4种群落类型。

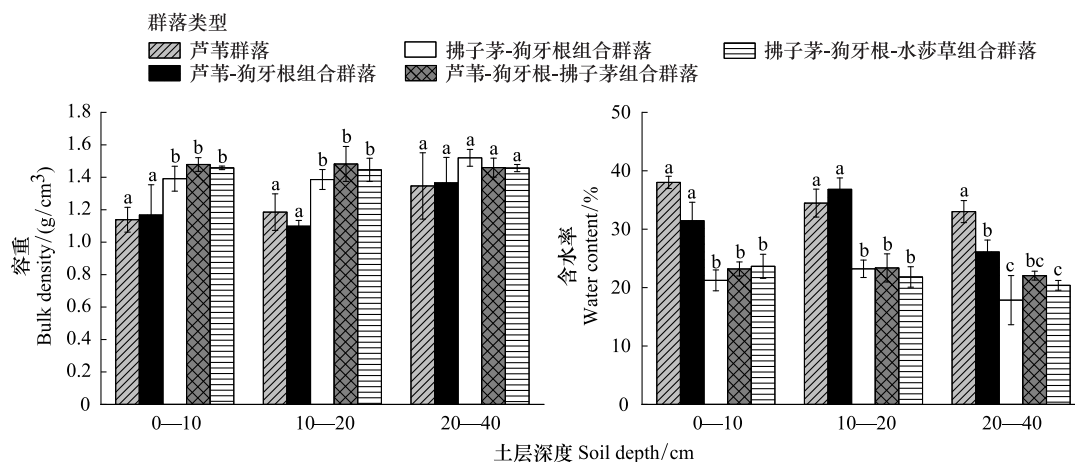


图4 不同典型群落类型土壤容重与含水率特征

Fig.4 The characteristics of soil bulk density and water content in different typical community types

表2表明,5种群落类型下土壤容重平均值依次为P-C-C( $1.47\text{ g/cm}^3$ )>C-C-J( $1.45\text{ g/cm}^3$ )>C-C( $1.43\text{ g/cm}^3$ )>P( $1.22\text{ g/cm}^3$ )>P-C( $1.21\text{ g/cm}^3$ )。5种群落类型的土壤含水率平均值分布规律为:P( $35.16\%$ )>P-C( $31.46\%$ )>P-C-C( $22.87\%$ )>C-C-J( $21.94\%$ )>C-C( $20.77\%$ )。

#### 2.4 河滨湿地不同植物群落土壤速效养分特征

图5表明,在0—10 cm和20—40 cm土层,P与P-C群落类型下土壤有机质含量均显著高于其它3种群落类型。在10—20 cm土层,P-C群落类型下土壤有机质含量均显著高于其它4种群落类型。在0—10 cm、10—20 cm和20—40 cm土层,P与P-C群落类型的土壤有效氮和有效磷含量均高于C-C、P-C-C、C-C-J三种群落类型。

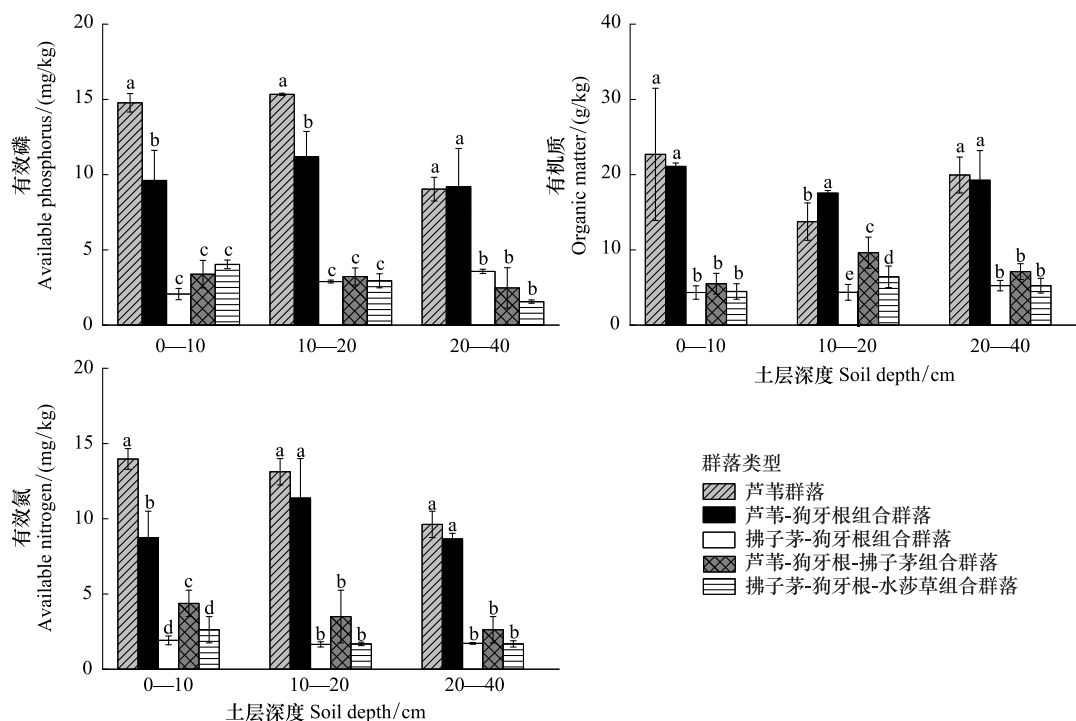


图5 不同典型群落类型的土壤养分特征

Fig.5 The characteristics of soil nutrient in different typical community types

表2表明,在0—40 cm土层,5种植物群落类型的有机质平均值依次为:P-C ( $19.29\text{ g/kg}$ )>P ( $18.8\text{ g/kg}$ )>P-C-C ( $7.41\text{ g/kg}$ )>C-C-J ( $5.37\text{ g/kg}$ )>C-C ( $4.64\text{ g/kg}$ )。在0—40 cm土层,5种植物群落类型的有效氮平均值依次为:P ( $12.24\text{ mg/kg}$ )>P-C ( $9.59\text{ mg/kg}$ )>P-C-C ( $3.5\text{ mg/kg}$ )>C-C-J ( $1.99\text{ mg/kg}$ )>C-C ( $1.76\text{ mg/kg}$ );5种群落类型的有效磷平均值依次为:P ( $13.05\text{ mg/kg}$ )>P-C ( $10.23\text{ mg/kg}$ )>P-C-C ( $3.02\text{ mg/kg}$ )>C-C-J ( $2.85\text{ mg/kg}$ )>C-C ( $2.83\text{ mg/kg}$ )。

#### 2.5 河滨湿地群落根系特征与土壤理化性质相关关系

相关性分析表明(表3),根生物量密度和土壤黏粒、粉粒呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与土壤含水率、有效氮显著正相关( $P<0.05$ ),与土壤砂粒含量呈极显著负相关( $P<0.01$ )。根长密度与土壤含水率、土壤黏粒、粉粒、有机质、有效氮、有效磷等呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与土壤砂粒呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与土壤容重呈显著负相关( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 河滨湿地不同植物群落的根系和土壤理化性质分布特征

根系作为土壤与植物地上部分之间物质、能量流动与信号传导的关键纽带,在保持水土、涵养水源、养分

循环等方面具有重要的生态功能。植物的根系分布特征决定了植物与土壤环境之间作用面积的大小,也影响着植物地上部分的生长发育状况<sup>[25]</sup>。根系的增多,一方面可以增加植物对养分的吸收面积,另一方面根系生长可以形成通道改善土壤的结构和通气透水能力。本研究表明芦苇群落的根生物量主要分布在 10—20 cm 和 20—40 cm 土层,这是由于芦苇属根茎型禾本科植物,地上株系生物量较大,需要根系深扎才能维持其生存;而土壤底层养分较少,芦苇需要扎根深层发展更多根系来吸收养分,从而导致根系分布特征随土壤深度增加,这与田晓燕等对芦苇采用室内盆栽控制实验的研究结果一致<sup>[26]</sup>。拂子茅-狗牙根、芦苇-拂子茅-狗牙根、拂子茅-水莎草-狗牙根三种植物群落下根系生长多集中分布在 0—10 cm 和 10—20 cm 表层土壤,这主要是由于植物群落中物种的组成如狗牙根、水莎草等物种主要以浅根系禾本科植物为主,其细根生物量主要分布在 0—20 cm 的土层中<sup>[17,27—28]</sup>。

表 3 根系结构特征与土壤理化性质相关关系分析

Table 3 Analysis of the correlations between root structure characteristics and soil physicochemical properties

| 项目<br>Items        | 根生物量密度/(mg/cm <sup>3</sup> )<br>Root biomass density | 根长密度/(cm/cm <sup>3</sup> )<br>Root length density | 平均直径/mm<br>Average root diameter |
|--------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------|
| 含水率 Water content  | 0.355 *                                              | 0.508 **                                          | -0.112                           |
| 黏粒 Clay            | 0.400 **                                             | 0.537 **                                          | -0.125                           |
| 粉粒 Silt            | 0.418 **                                             | 0.554 **                                          | -0.079                           |
| 砂粒 Sand            | -0.554 **                                            | -0.554 **                                         | 0.08                             |
| 有机质 Organic matter | 0.275                                                | 0.438 **                                          | -0.109                           |
| 有效氮 Available N    | 0.363 *                                              | 0.503 **                                          | -0.132                           |
| 有效磷 Available P    | 0.269                                                | 0.416 **                                          | -0.111                           |
| 容重 Bulk density    | -0.298                                               | -0.888 *                                          | -0.157                           |

\* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著; \*\* 在 0.01 级别(双尾),相关性显著

研究表明河滨湿地不同植物群落下生物量和土壤理化性质差异显著。5 种植物群落的生物量为芦苇群落(3389.42 g/m<sup>2</sup>)>芦苇-狗牙根群落(2484.65 g/m<sup>2</sup>)>芦苇-拂子茅-狗牙根群落(924.29 g/m<sup>2</sup>)>拂子茅-狗牙根群落(338.45 g/m<sup>2</sup>)>拂子茅-狗牙根-水莎草(252.69 g/m<sup>2</sup>)。植物群落的生物量差异较大,随着植物凋落物归还和残体的分解可以显著影响土壤的理化性质。芦苇和芦苇-狗牙根群落下土壤养分含量与含水率在 5 种群落种较大,这可能是由于其群落生物量较大,凋落物的归还量也相对较高,增加了土壤的水土保持能力和有机质含量,最终改变了土壤理化性质<sup>[29]</sup>。相关研究也认为不同植物类型下土壤理化性质的差异主要是由于植被生物量与凋落物数量的差异<sup>[30—33]</sup>。本研究也表明,芦苇-拂子茅-狗牙根群落、拂子茅-狗牙根群落、拂子茅-狗牙根-水莎草群落的土壤机械组成以砂粒为主,土壤养分的保持能力较低<sup>[34]</sup>,而芦苇和芦苇-狗牙根群落的土壤主要以粉粒为主,细颗粒拥有更大的比表面积,更容易吸附养分粒子,促进土壤有机质的积累<sup>[35]</sup>。

### 3.2 河滨湿地植物群落根系特征和土壤性质的相关性

研究区河滨湿地植物群落的根生物量密度、根长密度与土壤有机质、有效氮、有效磷含量呈显著正相关( $P<0.05$ ),与土壤砂粒含量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),这表明土壤根系越丰富,根系通过分解可以向土壤中释放土壤有机质与养分<sup>[36—38]</sup>,也有研究表明植物的根系生长越复杂,越能有效的阻止土壤有效磷的流失,从而提高土壤有效磷含量<sup>[39]</sup>。Vogt 等发现土壤结构和养分状况是决定根系生长发育的重要因素,细根生产主要受养分条件的控制<sup>[40]</sup>。研究区植物根系的生长和分布不仅受物种遗传特性的影响,也受到土壤环境的影响<sup>[41]</sup>。土壤中的有机质增加也会对植物根系的生长起到积极的促进作用,Jackson<sup>[42]</sup>等的研究也表明细根的垂直分布主要由土壤中氮含量控制。氮素的来源主要是植物残体的降解和生物固氮,也有研究表明氮的增加会促进总根量增加<sup>[43—44]</sup>,这是因为土壤养分有效性增加会使细根分配到更多碳同化物,进而促进细根生长和生物量积累<sup>[45]</sup>。土壤根系的分布特征也会对土壤的质地产生重要影响,河滨湿地植物群落根系通过穿透和根际效应破坏土壤大颗粒结构,同时根系分泌物所产生的有机物会影响土壤颗粒的胶结,可能会影响土壤团

聚体的形成,从而对土壤物理结构以及机械组成产生影响<sup>[46]</sup>。本研究中芦苇-拂子茅-狗牙根群落、拂子茅-狗牙根群落、拂子茅-狗牙根-水莎草群落的土壤机械组成均为砂粒质量分数远大于粉粒和黏粒,这与三种植物群落的根系分布特征具有密切的关系。河滨湿地植被根系通过物理穿透和根际效应有效影响土壤容重和水分<sup>[47-48]</sup>,较大的土壤容重会导致土壤孔隙度的降低,从而限制河滨湿地植被根系的生长<sup>[49]</sup>。

#### 4 结论

(1) 河滨湿地植物群落的物种组成可以显著影响根系的含量及分布特征。在 0—40 cm 土层,芦苇群落和芦苇-狗牙根群落的根生物量密度和根长密度均值均高于芦苇-拂子茅-狗牙根群落、拂子茅-狗牙根群落和拂子茅-狗牙根-水莎草群落。芦苇群落和芦苇-狗牙根群落的根生物量密度、根长密度主要分布在 10—40 cm 的土层,而其他三种植物群落类型主要分布在 0—20 cm 的表层土壤。

(2) 河滨湿地植物群落的物种组成显著影响土壤的养分含量和土壤物理性状。芦苇群落、芦苇-狗牙根群落的土壤以粉粒为主,其他三种植物群落土壤以砂粒为主。芦苇群落、芦苇-狗牙根群落的土壤含水率、土壤有机质、有效氮和有效磷含量均显著高于其他三种群落,土壤容重则显著低于其他三种群落。河滨湿地植物群落根生物量密度、根长密度均与土壤黏粒含量、粉粒含量、土壤含水率、有效氮显著正相关。在退化河滨湿地生态系统恢复过程中,可以通过优化河滨湿地的植物群落组成促进土壤中植物根系的生长和土壤性状的改善。同时还要进一步开展长期的野外控制试验,深入研究和阐明河滨湿地植物群落的根系特征与土壤性质的耦合机制。

#### 参考文献 (References):

- [1] Västila K, Järvelä J. Characterizing natural riparian vegetation for modeling of flow and suspended sediment transport. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(10): 3114-3130.
- [2] Ledesma J L J, Futter M N, Blackburn M, Lidman F, Grabs T, Sponseller R A, Laudon H, Bishop K H, Köhler S J. Towards an improved conceptualization of riparian zones in boreal forest headwaters. *Ecosystems*, 2018, 21(2): 297-315.
- [3] Gu S, Gruau G, Dupas R, Rumpel C, Crème A, Fovet O, Gascuel-Oudou C, Jeanneau L, Humbert G, Petitjean P. Release of dissolved phosphorus from riparian wetlands: evidence for complex interactions among hydroclimate variability, topography and soil properties. *Science of the Total Environment*, 2017, 598: 421-431.
- [4] Busato L, Boaga J, Perri M T, Majone B, Bellin A, Cassiani G. Hydrogeophysical characterization and monitoring of the hyporheic and riparian zones: the Vermigliana Creek case study. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 1105-1120.
- [5] 李青山, 王冬梅, 信忠保, 李扬, 任远. 漓江水陆交错带典型立地根系分布与土壤性质的关系. *生态学报*, 2014, 34(8): 2003-2011.
- [6] 游海林, 徐力刚, 姜加虎, 许加星, 邓建明, 王晓龙. 湿地植物根系生长动态及其环境响应性研究进展. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(S1): 52-58.
- [7] Böhm W. *Methods of Studying Root Systems*. Berlin: Springer, 1979: 28-181.
- [8] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 田积莹. 草类根系对土壤抗冲性的强化效应. *土壤学报*, 1992(03): 302-309.
- [9] 宋香静, 李胜男, 郭嘉, 韦玮, 于一雷. 环境变化对湿地植物根系的影响研究. *水生态学杂志*, 2017, 38(2): 1-9.
- [10] 毛齐正, 杨喜田, 苗蕾. 植物根系构型的生态功能及其影响因素. *河南科学*, 2008, 26(2): 172-176.
- [11] 黄林, 王峰, 周立江, 黄茹, 齐代华, 魏刚. 不同森林类型根系分布与土壤性质的关系. *生态学报*, 2012, 32(19): 6110-6119.
- [12] 吕渡, 杨亚辉, 赵文慧, 雷斯越, 张晓萍. 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. *生态学报*, 2018, 38(11): 3979-3987.
- [13] 樊博, 林丽, 曹广民, 柯浔, 李以康, 杜岩功, 郭小伟, 李茜, 钱大文, 兰玉婷, 周春丽. 不同演替状态下高寒草甸土壤物理性质与植物根系的相互关系. *生态学报*, 2020, 40(7): 2300-2309.
- [14] 罗永清, 赵学勇, 王涛, 李玉强. 沙地植物根系特征及其与土壤有机碳和总氮的关系. *草业学报*, 2017, 26(8): 200-206.
- [15] 韦兰英, 上官周平. 黄土高原不同演替阶段草地植被细根垂直分布特征与土壤环境的关系. *生态学报*, 2006, 26(11): 3740-3748.
- [16] 张良德, 徐学选, 胡伟, 李星. 黄土丘陵区燕沟流域人工刺槐林的细根空间分布特征. *林业科学*, 2011, 47(11): 31-36.
- [17] 钟荣华, 贺秀斌, 鲍玉海, 唐强, 胡云华. 三峡水库消落带几种草本植物根系的垂直分布特征. *水土保持通报*, 2015, 35(6): 235-240.
- [18] 余新晓, 毕华兴, 朱金兆, 吴斌. 黄土地区森林植被水土保持作用研究. *植物生态学报*, 1997, 21(5): 433-440.

- [19] 郭二辉, 孙然好, 陈利顶. 河岸植被缓冲带主要生态服务功能研究的现状与展望. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1830-1837.
- [20] 李长看, 马灿玲, 王威, 丁晋利. 郑州黄河湿地生物资源及保护研究(英文). 农业科学与技术, 2010, 11(6): 159-163.
- [21] 马维伟, 王辉, 李广, 石万里, 赵锦梅, 罗永忠, 聂志刚, 薛景文. 甘南杂海湿地退化过程中植被生物量变化及其季节动态. 生态学报, 2017, 37(15): 5091-5101.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 郝仲勇, 杨培岭, 刘洪禄, 姚春梅. 苹果树根系分布特性的试验研究. 中国农业大学学报, 1998, 3(6): 63-66.
- [24] 刘兴良, 马钦彦, 杨冬生, 史作民, 宿以明, 周世强, 刘世荣, 杨玉坡. 川西山主要人工林种群根系生物量与生产力. 生态学报, 2006, 26(2): 542-551.
- [25] Hansson K, Helmisaari H S, Sah S P, Lange H. Fine root production and turnover of tree and understorey vegetation in Scots pine, silver birch and Norway spruce stands in SW Sweden. Forest Ecology and Management, 2013, 309: 58-65.
- [26] 田晓燕, 陈敏, 路峰, 王安东, 韩广轩, 管博. 黄河三角洲芦苇生长与根系分布特征对不同时期水盐胁迫的响应. 生态学杂志, 2019, 38(2): 404-411.
- [27] 邓强, 李婷, 袁志友, 焦峰. 黄土高原 4 种植被类型的细根生物量和年生产量. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3091-3098.
- [28] 桑凯新, 胡淦林, 黄超, 杨喜田, 郭二辉. 黄河河岸带 5 种植物类型根系结构特征对土壤渗透性的影响. 中国水土保持科学, 2020, 18(5): 1-8.
- [29] 时林, 冯若昂, 靖淑慧, 张天举. 黄河三角洲不同植被类型下土壤 pH 与盐分差异分析. 环境科学导刊, 2017, 36(3): 14-17.
- [30] 刘飞渡, 韩蕾. 亚热带红壤丘陵区不同人工林型对土壤理化性质、微生物类群和酶活性的影响. 生态环境学报, 2015, 24(9): 1441-1446.
- [31] 夏汉平, 余清发, 张德强. 鼎湖山 3 种不同林型下的土壤酸度和养分含量差异及其季节动态变化特性. 生态学报, 1997, 17(6): 645-653.
- [32] 蔡楠, 孙旭, 刘永宏. 包头黄河湿地不同植物群落土壤养分分布特征. 北方园艺, 2021, (10): 80-87.
- [33] 曹国栋, 陈接华, 夏军, 朱宏伟, 蒋永超, 张霞, 王绍明. 玛纳斯河流域扇缘带不同植被类型下土壤物理性质. 生态学报, 2013, 33(1): 195-204.
- [34] 胡雷, 王长庭, 阿的鲁骥, 字洪标. 高寒草甸植物根系生物量及有机碳含量与土壤机械组成的关系. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2015, 41(1): 6-11.
- [35] 王青, 袁勇, 李传哲, 冯婧, 耿思敏. 白洋淀湿地土壤氮素空间分布特征研究. 环境保护科学, 2013, 39(4): 1-6.
- [36] 白军红, 崔保山, 李晓文, 周兰芹. 向海芦苇沼泽湿地土壤铵态氮含量的季节动态变化. 草业学报, 2006, 15(1): 117-119.
- [37] 程云环, 韩有志, 王庆成, 王政权. 落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性关系研究. 植物生态学报, 2005, 29(3): 403-410.
- [38] 祝乐, 许晨阳, 耿增超, 刘莉丽, 侯琳, 王志康, 王强, 陈树兰, 李倩倩. 秦岭 3 种天然林细根分布特征及其与土壤理化性质的关系. 林业科学, 2020, 56(2): 24-31.
- [39] 张昂, 钟壹鸣, 鱼欢, 吉训志, 宗迎, 贺书珍, 秦晓威. 槟榔间作香露兜模式下土壤微生物区系分析. 西南农业学报, 2022, 35(4): 941-949.
- [40] Vogt K A, Vogt D J, Palmiotto P A, Boon P, O'Hara J, Ashbjornsen H. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. Plant and Soil, 1995, 187(2): 159-219.
- [41] 燕辉, 刘广全, 李红生. 青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度变化. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2763-2768.
- [42] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, Mooney H A, Sala O E, Schulze E D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. Oecologia, 1996, 108(3): 389-411.
- [43] 李忠佩, 王效举. 小区域水平土壤有机质动态变化的评价与分析. 地理科学, 2000, 20(2): 182-188.
- [44] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻根系的分布及其与产量的关系. 华南农业大学学报: 自然科学版, 2003, 24(3): 1-4.
- [45] King J S, Albaugh T J, Allen H L, Buford M, Strain B R, Dougherty P. Below-ground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and fine root dynamics in Loblolly Pine. New Phytologist, 2002, 154(2): 389-398.
- [46] Rosell R A, Galantini J A, Suñer L G. Long-term crop rotation effects on organic carbon, nitrogen, and phosphorus in haplustoll soil fractions. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2000, 14(4): 309-315.
- [47] 陈义君, 彭石磊, 湛芸, 李叶鑫, 王洋洋, 张越. 紫色土坡耕地香根草根系的固土抗蚀效应. 草业科学, 2015, 32(4): 485-491.
- [48] 王璐, 仲启铖, 陆颖, 刘倩, 曹流芳, 巩晋楠, 王开运. 群落配置对滨海围垦区土壤理化性质的影响. 土壤学报, 2014, 51(3): 638-647.
- [49] 张瑞红, 蔡文涛, 来利明, 姜联合, 王永吉, 郑元润. 鄂尔多斯高原灌草群落土壤理化性质变化. 草业科学, 2018, 35(6): 1352-1360.