

DOI: 10.20103/j.stxb.202207111979

李云飞, 张雪, 刘智贤, 王培源, 刘秉青, 杨昊天, 刘立超, 吴旭东. 宁夏荒漠草原蒙古冰草功能性状和根际效应对土壤性状的响应. 生态学报, 2023, 43(21): 8683-8691.

Li Y F, Zhang X, Liu Z X, Wang P Y, Liu B Q, Yang H T, Liu L C, Wu X D. Response of functional traits and rhizosphere effects of *Agropyron mongolicum* to soil properties in desert steppe of Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8683-8691.

宁夏荒漠草原蒙古冰草功能性状和根际效应对土壤性状的响应

李云飞^{1,2}, 张雪¹, 刘智贤³, 王培源⁴, 刘秉青⁴, 杨昊天¹, 刘立超¹, 吴旭东^{5,*}

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 沙坡头沙漠研究试验站, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 101408

3 宁夏回族自治区中卫市沙坡头区气象局, 中卫 755000

4 宁夏大学生态环境学院, 银川 750002

5 宁夏农林科学院林业与草地生态研究所, 银川 750002

摘要:植物功能性状组合的权衡是植物适应土壤环境的重要机制, 它也通过对根际效应的调控进而影响着根际过程和生态系统功能。以位于宁夏盐池县的典型荒漠草原为研究区域, 通过对灰钙土、黑垆土和风沙土中蒙古冰草功能性状和根际效应的对比分析, 探究不同土壤对蒙古冰草功能性状和根际效应的影响以及它们之间的关系。结果表明: (1) 不同土壤中蒙古冰草根际和非根际土壤理化性质存在显著差异, 根际土壤理化性质的变化与非根际土壤性质有关。(2) 不同土壤中的根际效应大小存在差异, 不同因子的根际效应大小因土壤而异, 总体表现为风沙土最大, 灰钙土最小; 土壤理化性质是影响蒙古冰草根际效应的主要因素, 可解释根际效应变异的 69.5%。(3) 土壤理化性质与蒙古冰草功能性状密切相关, 其对根长和根冠比的影响最大; 蒙古冰草功能性状与根际效应大小密切相关, 根长和根冠比是影响根际效应的主要因子。研究表明蒙古冰草通过根际效应改善了土壤性质, 进而提高土壤质量, 这种作用受土壤理化性质和植物功能性状等因子的共同影响。

关键词:蒙古冰草; 功能性状; 根际效应; 土壤理化性质

Response of functional traits and rhizosphere effects of *Agropyron mongolicum* to soil properties in desert steppe of Ningxia

LI Yunfei^{1,2}, ZHANG Xue¹, LIU Zhixian³, WANG Peiyuan⁴, LIU Bingqing⁴, YANG Haotian¹, LIU Lichao¹, WU Xudong^{5,*}

1 Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

3 Ningxia Zhongwei Shapotou District Meteorological Bureau, Zhongwei 755000, China

4 College of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan 750002, China

5 Institute of Forestry and Grassland Ecology, NingXia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China

Abstract: The balancing of plant functional traits combination is an important mechanism for plants to adapt to the soil environment, and it also affects rhizosphere processes and ecosystem functions by regulating rhizosphere effects (RE). The typical desert steppe in Yanchi County of Ningxia was selected as the study area. The effects of different soils on the

基金项目:宁夏回族自治区农业科技自主创新资金项目 (NGSB-2021-14-04); 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2022CMG03049); 宁夏回族自治区科技惠民专项 (2022CMG03005)

收稿日期:2022-07-11; **网络出版日期:**2023-06-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wxd2008lovejz@126.com

functional traits and RE of *Agropyron mongolicum* and their relationships were explored through comparing the functional traits and REs of *A. mongolicum* in sierozem soil, dark loessial soil and aeolian soil. Results highlighted that: (1) there were significant differences in the physicochemical properties of the rhizosphere and non-rhizosphere soils in different soil types, and the changes of physicochemical properties of rhizosphere soil were related to the properties of non-rhizosphere soil. (2) There were differences in the RE in different soils, and the RE size of different factors varied with soil. The overall performance of RE was the largest in aeolian soil and the smallest in sierozem soil. Soil physicochemical properties were the main factors affecting the RE of *A. mongolicum*, which could explain 69.5% of the variation of RE. (3) Soil physicochemical properties were closely related to the functional traits of *A. mongolicum*, which had the greatest impact on root length and root-shoot ratio. The functional traits of *A. mongolicum* were closely related to the RE size, and root length and root-shoot ratio were the main factors affecting RE. This study indicated that the *A. mongolicum* improved soil properties and soil quality through RE, which was regulated by soil physicochemical properties and plant functional traits together.

Key Words: *Agropyron mongolicum*; functional trait; rhizosphere effect; soil physicochemical properties

植物功能性状包括植物所有形态学、生理学和物候学上可测量的性状,小到细胞大到植物体水平均属于植物功能性状的范畴^[1-2]。它不仅是一系列与植物定植、存活、生长和死亡等过程密切相关的植物属性,还是气候、干扰和生物条件等环境因子对植物筛选的结果^[3]。植物功能性状作为连接植物与环境的桥梁,它将环境、植物个体和生态系统功能、结构和过程等紧密地联系起来^[4-5],不仅反映了植物在获取、利用和保存资源方面的能力,还通过改变高度、根长等功能性状来适应环境变化,这种变化也是生态系统功能变化的体现^[6-7]。植物功能性状受气候因子^[8]、土地利用^[9]、地形^[10-11]和土壤因子^[12]等多种环境因子的共同影响,虽有大量研究对环境因子与植物功能性状之间的关系进行了广泛的探讨,但大多集中在自然环境因子^[13-14]和人为干扰因子^[15-16]方面,土壤因子与植物功能性状关系的研究较少且结论不一。土壤被认为是植物功能性状的主导者,植物常通过不同的生长形态策略来适应不同的土壤环境^[17],性状组合的权衡可能是植物适应土壤环境的重要机制之一,进而影响植物根际过程和生态系统功能^[18]。

根际被认为是直接紧密附着在根系上的一层土壤,通常是根系表面到 1—3mm 的圆柱体范围^[19]。根际土壤中居住着大量的微生物,它们受根系分泌物的强烈影响,对植物的生长发育和健康至关重要^[19]。植物根系通过植物-土壤相互作用调控着根际土壤碳、氮和养分循环^[20-21]。强烈的根际过程使根际土壤和无根土壤的物理、化学或生物性质发生变化,这种变化称为根际效应^[22-23]。根际效应大小受植物-土壤相互作用复杂过程的影响,植物生理和形态特征、土地利用方式、土壤属性和季节等都影响着根际效应的大小^[19, 24-26]。植物功能性状的差异是环境影响的结果,植物通过权衡各功能性状组合的策略从土壤中获取自身生长所需养分,同时,植物也通过根际效应调节着土壤养分循环和有效性。在大多数陆地生态系统中,营养缺乏威胁着植物的生产和生态系统的稳定^[27-28]。根际养分有效性直接影响着植物生长和发育,它也受土壤性质、植物特性和气候等多种因素的影响^[29-30]。然而,对这些因子在调节根际养分有效性和根际效应方面的作用的定量了解在很大程度上仍不清楚。

荒漠草原是我国西北干旱区主要的草地类型之一,也是宁夏面积最大的草地类型,宁夏荒漠草地面积约 134.44 万 hm^2 ,占全部草地面积的 55.02%^[31]。盐池县荒漠草原是荒漠草原生态系统的典型区域代表^[32],对当地的农牧业发展和维持生态平衡起着重要作用。由于地处毛乌素沙地和黄土高原的过渡带,土壤类型多样,土壤属性存在较大差异。因此,本研究通过分析盐池县不同类型土壤中蒙古冰草的功能性状和根际效应特征,通过探讨不同土壤中植物功能性状与根际效应的关系,旨在阐明土壤类型对植物功能性状和根际效应的影响,掌握植物-土壤相互作用以及土壤属性与植物功能性状和根际效应之间的关系,为当地草地管理和退化草地恢复中物种的选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区盐池县(37°04′—38°10′ N、106°30′—107°41′ E)位于宁夏回族自治区东部,海拔在1295—1951 m之间,呈南高北低、中部高东西低的特点。地处宁夏与甘肃、陕西和内蒙的交界地带,是毛乌素沙地和黄土高原的过渡带,也是半干旱与干旱气候的过渡区,属典型大陆性季风气候。年均降水250—350 mm,80%集中在5—9月,从南向北呈递减趋势。年均温8.1℃,1月平均最低温-13.0℃,7月平均最高气温22.7℃。土壤以灰钙土、风沙土和黑垆土为主,土壤肥力较低、易受侵蚀。南部黄土丘陵区主要以黑垆土为主,占到整个南部地区土地面积的4/5以上;北部地区以风沙土和灰钙土为主,面积分别占北部地区的46.5%和45%^[33]。

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计

于2020年5月在宁夏农林科学院大水坑的野外试验基地内,布设9个2 m×2 m的实验样方,移去1 m深原有土壤,然后分别于火山子(37°56′ N、107°06′ E)、麻黄山(37°16′ N、107°02′ E)和哈巴湖(38°05′ N、107°03′ E)分层挖取1 m深原状典型灰钙土、黑垆土和风沙土,按深度顺序回填坑内,每种类型土壤3个样方,每个样方四边使用阳光板隔离,地下埋深50 cm,地上外露20 cm,避免外界土壤干扰。样方布设好之后使其沉降一年(2020年5月至2021年4月)以去除回填的扰动,在其沉降期间定期拔出样方中长大的所有植物以消除土壤种子库对后期播种的影响。2021年4月分别对每个样地的土壤理化性状进行了测定,并与未扰动土壤进行了比对分析,结果表明样方土壤理化性状与未扰动土壤无显著差异。随后,分别在9个样方中按照相同的密度行状播种蒙古冰草,行间距20 cm。待所有样方出苗后,对每个样方中的蒙古冰草幼苗进行间苗,使其密度相同(45株/m²)。

1.2.2 样品采集及测定方法

2021年9月下旬,蒙古冰草已经完成生活史并开始枯萎时,在每个样方中随机选取若干蒙古冰草,测定株高后,以植株为中心挖取半径为20 cm、深30 cm的土柱,土柱小心敲碎后,捡拾所有与植株相连的根系以获得样株完整根系,抖落根系附着的松散土壤后,用刷子刷取根系附着土壤,作为根际土壤样品。按照五点取样法在无植物生长的空地采集0—20 cm无根系土壤样品,作为非根际土壤。同一样方中同一类型的土样混合成一个样品,一共18个混合样(9个根际样品,9个非根际样品)。样品带回实验室自然风干,去除残留的根系后过2 mm筛,用于测定土壤理化性质。有机碳采用总有机碳分析仪(Vario TOC, Elementar, DE)测定,微生物碳采用氯仿熏蒸—K₂SO₄浸提法测定^[34],硝态氮和铵态氮含量分别用酚二磺酸比色法和靛酚蓝比色法测定^[35],速效氮为硝态氮和氨态氮含量之和,速效磷采用Olsen法,速效钾采用1 mol/L pH=7.0乙酸铵浸提-火焰光度法,pH和电导率分别用5:1和2.5:1水土比浸提测定^[36]。

采集根际样品同时,将相对应的蒙古冰草植株完整带回实验室,测定其功能性状(根长、根直径),然后将地上部分和地下部分分别置于信封中。于105℃杀青30 min后,置于65℃下烘干至恒重,采用分析天平称其干。

1.3 数据处理

根际效应(RE)的大小是根据根际土壤和非根际土壤样品之间某一土壤参数的百分比差来计算的^[37],即

$$RE = (V_R - V_B) \times 100\%$$

其中, V_R 和 V_B 分别为根际土壤和非根际土壤的土壤参数。一个正的根际效应表明根际土壤变化速率较高相对于非根际土壤,而负根际效应表明在非根际土壤中土壤变化速率大于根际土壤。

采用单因素方差分析法分析土壤类型对蒙古冰草各功能性状、非根际和根际土壤理化性质的影响,利用LSD法进行显著性检验($\alpha=0.05$)。用Pearson相关性方法对土壤理化性质与植物功能性状和植物功能性状与根际效应之间进行相关性分析。基于已知的和潜在的变量之间的关系,拟合了结构方程模型,确定了土壤

类型对土壤理化性质和蒙古冰草功能性状的影响,并最终确定了土壤类型对根际效应的影响。考虑到各因子之间的共线性问题以及为了简化模型,对 10 个土壤理化性质指标和 10 个根际效应指标采用主成分分析进行了降维,结果表明第一主成分可以较好解释所有变量的特征,因此,取其第一主成分纳入结构方程模型进行分析。土壤理化性质和根际效应的主成分分析结果见附表 1 和附表 2。土壤理化性质和根际效应的第一主成分分别可解释它们 58.24% 和 73.34% 的方差。我们选择 χ^2 检验和近似均方根误差 (RMSE) 来评估模型的适合性。采用 SPSS 26.0 (SPSS Inc., Illinois, 美国) 进行数据统计分析。用 Origin 9.0 (Origin Lab Corp., 美国) 作图。用 AMOS 17 进行结构方程模型分析。

2 结果与分析

2.1 蒙古冰草功能性状和生物量

三种类型土壤中蒙古冰草功能性状和生物量的变化特征如表 1 所示。方差分析结果表明,不同类型土壤之间蒙古冰草的株高、根直径、地上生物量、地下生物量和总生物量的差异均不显著 ($P>0.05$),风沙土中蒙古冰草根长和根冠比显著高于灰钙土和黑垆土 ($P<0.05$)。

表 1 不同类型土壤中蒙古冰草功能性状和生物量

Table 1 The characteristics of functional traits and biomass of *Agropyron mongolicum* in different soils

性状 Traits	灰钙土 Sierozem soil	黑垆土 Dack loessial soil	风沙土 Aeolian soil
株高 Plant height/cm	47.55±2.94a	49.65±2.20a	44.75±1.83a
根长 Root length/cm	15.30±0.98b	14.95±0.72b	18.65±1.00a
根直径 Root diameter/mm	1.34±0.14a	1.05±0.13a	1.24±0.10a
地上生物量 Above-ground biomass/g	3.38±0.46a	3.27±0.48a	3.12±0.48a
地下生物量 Under-ground biomass/g	1.78±0.32a	1.25±0.29a	1.93±0.55a
总生物量 Total biomass/g	5.16±0.66a	4.52±0.74a	5.05±0.94a
根冠比 Root/shoot ratio	0.55±0.07ab	0.33±0.05b	0.67±0.15a

不同字母表示不同类型土壤之间存在显著差异 ($P<0.05$)

2.2 土壤理化性质

非根际土壤和根际土壤理化性质在不同类型土壤之间均存在显著差异 (图 1, $P<0.05$)。在非根际土壤和根际土壤中,速效钾、有机碳、可溶性碳、硝态氮、氨态氮和速效氮含量均表现为灰钙土最大、风沙土最小,电导率黑垆土最大,pH 风沙土最高。速效磷含量和微生物量碳在非根际土壤中表现为黑垆土最高,而在根际土壤中则是风沙土最高。与非根际土壤相比,根际土壤除了电导率、pH 和硝态氮含量降低外,其他指标均呈增加趋势,表现出了明显的“肥岛”聚集效应。

2.3 蒙古冰草根际效应

不同土壤指标的根际效应存在显著差异,同一土壤指标的根际效应在不同类型土壤之间也存在较大差异 (图 2)。灰钙土中根际效应大小为 -10.47%—70.06%,黑垆土为 -33.64%—91.91%,风沙土为 -8.36%—248.16%。在灰钙土和黑垆土中,电导率和硝态氮在均表现为负效应,其他土壤因子均为正效应,根际效应对微生物量碳的影响最大 (图 2)。而在风沙土中,氨态氮和速效氮表现为负效应,速效钾、速效磷、电导率、有机碳、可溶性碳、微生物量碳和硝态氮均表现为正效应,根际效应对有机碳的影响最大 (图 2)。

2.4 土壤理化性质对蒙古冰草功能性状和根际效应的影响

相关性分析表明,蒙古冰草功能性状与土壤理化性质密切相关 (表 2)。土壤理化性质显著影响根长和根冠比,土壤速效磷、电导率、有机碳、微生物量碳和硝态氮与根长呈显著正相关关系 ($P<0.01$),氨态氮和速效氮与根长呈显著负相关关系 ($P<0.01$)。速效钾、溶解性碳、氨态氮和速效氮与根冠比呈显著负相关关系 ($P<0.05$),而电导率与根冠比呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。

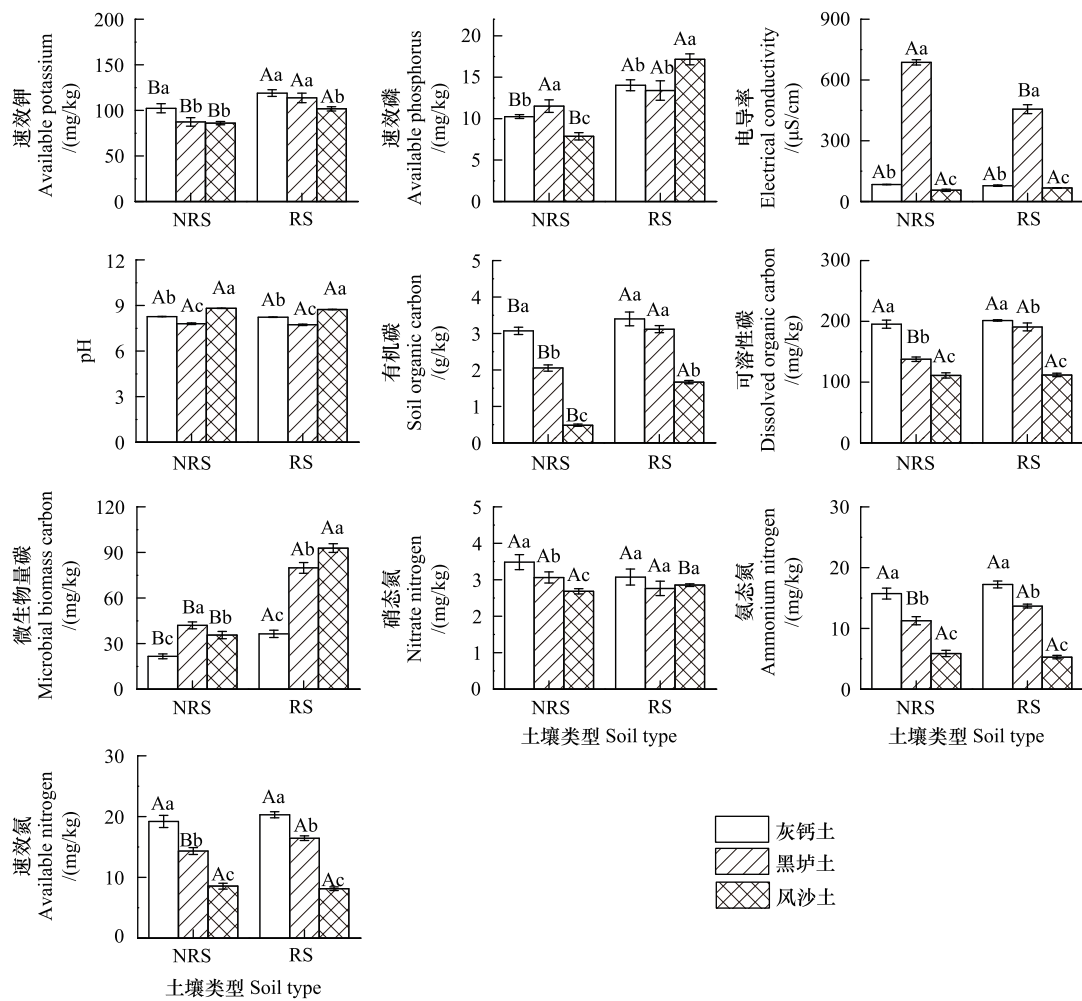


图 1 蒙古冰草根际和非根际土壤理化性质

Fig.1 The physicochemical properties of rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Agropyron mongolicum* in different soil

NRS:非根际土壤,RS:根际土壤;不同大写字母表示根际和非根际土壤之间存在显著差异 ($P<0.05$),不同小写字母表示不同类型土壤之间存在显著差异 ($P<0.05$)

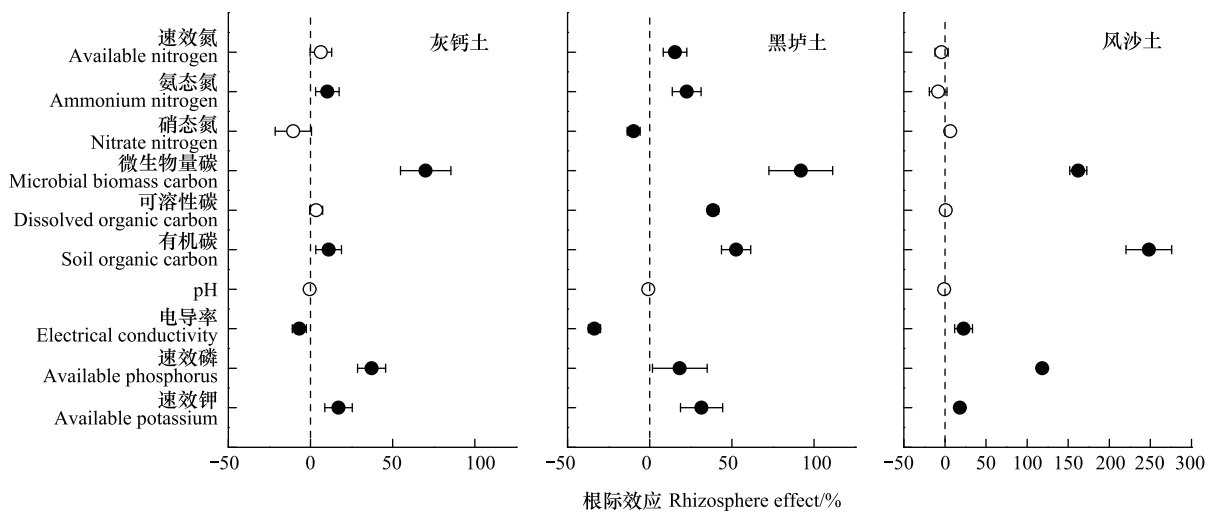


图 2 不同类型土壤中蒙古冰草根际效应大小

Fig.2 The size of rhizosphere effect of *Agropyron mongolicum* in different soils

实心圆点表示根际效应显著,空心圆点表示根际效应不显著

蒙古冰草的根际效应与功能性状的相关性分析表明,根际效应的大小与植物功能性状密切相关(表3)。速效磷、有机碳、硝态氮、氨态氮和速效氮的根际效应与根长呈显著负相关关系($P<0.05$),电导率的根际效应与根冠比呈显著负相关关系($P<0.05$),而pH的根际效应则与根冠比呈显著正相关关系($P<0.05$)。

结构方程模型表明,土壤类型显著影响着土壤理化性质,根冠比和根长受土壤理化性质的调控,同时,根长也显著影响着根冠比;理化性质除了通过直接影响根长和根冠比而间接影响根际效应,它还直接影响着64%的根际效应变异(图3)。通过计算各因子对根际效应的标准化总影响(标准化总影响=标准化直接影响+标准化间接影响),结果表明土壤类型、土壤理化性质、根长和根冠比分别可解释根际效应变异的68.4%、69.5%、14.7%和18.7%(图3)。

表2 土壤理化性质与植物功能性状的关系

Table 2 The relationship between soil physicochemical properties and plant functional traits

理化性质 Physicochemical properties	株高 Plant high	根直径 Root diameter	根长 Root length	地上生物量 Above-ground biomass	地下生物量 Under-ground biomass	总生物量 Total biomass	根冠比 Root/shoot ratio
速效钾 Available potassium	0.083	-0.218	-0.205	0.139	-0.042	0.061	-0.332 **
速效磷 Available phosphorus	-0.192	0.082	0.384 **	-0.040	0.136	0.046	0.252
电导率 Electrical conductivity	-0.173	0.127	0.351 **	-0.013	0.179	0.085	0.300 *
pH	-0.113	0.111	-0.199	0.015	0.025	0.022	-0.020
有机碳 Soil organic carbon	-0.157	0.003	0.375 **	-0.050	0.086	0.014	0.191
溶解性有机碳 Dissolved organic carbon	0.159	-0.195	-0.196	0.031	-0.126	-0.046	-0.263 *
微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	-0.185	0.018	0.375 **	-0.028	0.154	0.063	0.243
硝态氮 Nitrate nitrogen	-0.162	0.032	0.386 **	-0.040	0.101	0.028	0.228
铵态氮 Ammonium nitrogen	0.202	-0.114	-0.366 **	0.017	-0.157	-0.071	-0.286 *
速效氮 Available nitrogen	0.203	-0.119	-0.358 **	0.046	-0.143	-0.046	-0.296 *

** $P<0.01$, * $P<0.05$

表3 植物功能性状与根际效应的关系

Table 3 The relationship between plant functional traits and rhizosphere effects

根际效应 Rhizosphere effect	株高 Plant high	根直径 Root diameter	根长 Root length	地上生物量 Above-ground biomass	地下生物量 Under-ground biomass	总生物量 Total biomass	根冠比 Root/shoot ratio
速效钾 Available potassium	0.005	-0.028	-0.199	0.037	-0.042	0.001	-0.037
速效磷 Available phosphorus	0.095	-0.016	-0.348 **	0.027	-0.114	-0.043	-0.250
电导率 Electrical conductivity	0.163	-0.200	-0.224	0.005	-0.158	-0.079	-0.278 *
pH	-0.198	0.125	0.357	-0.030	0.153	0.061	0.283 *
有机碳 Soil organic carbon	0.109	0.064	-0.327 *	0.049	-0.046	0.005	-0.117
溶解性有机碳 Dissolved organic carbon	0.036	0.151	-0.223	0.059	0.078	0.075	0.018
微生物生物量碳 Microbial biomass carbon	0.076	-0.241	0.045	-0.020	-0.148	-0.089	-0.154
硝态氮 Nitrate nitrogen	0.108	0.126	-0.409 **	-0.020	-0.080	-0.053	-0.077
铵态氮 Ammonium nitrogen	0.085	0.058	-0.363 **	0.023	-0.054	-0.014	-0.127
速效氮 Available nitrogen	0.158	0.108	-0.317 *	0.110	-0.046	0.042	-0.161

** $P<0.01$, * $P<0.05$

3 讨论

土壤类型对蒙古冰草功能性状和根际效应有显著影响,这主要由于不同类型土壤的理化性质差异所致(图3)。植物的生长发育状况除了受植物本身的生理特性影响外,外界环境因子也是影响其的重要因素。土

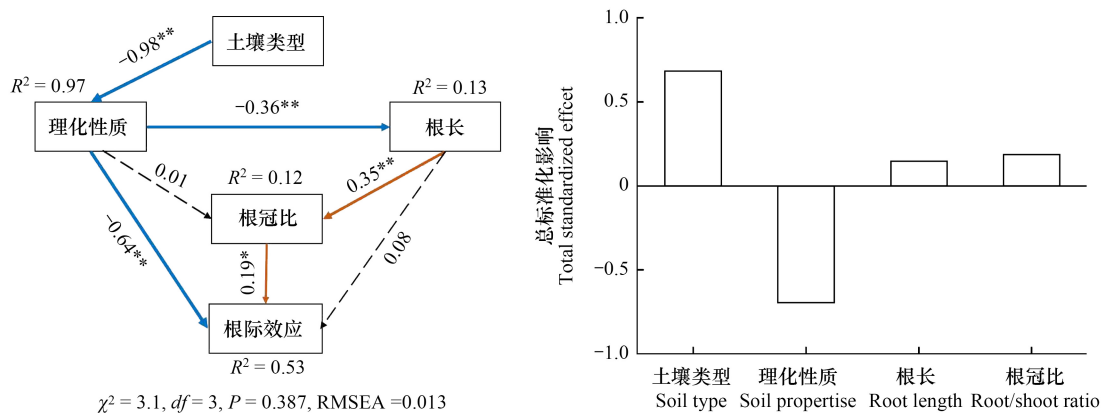


图3 土壤类型对蒙古冰草功能性状和根际效应的影响

Fig.3 The effects of soil types on the functional traits and rhizosphere effect of *Agropyron mongolicum*

结构方程模型中,蓝色实线表示负效应,红色实线表示正效应,线的粗细代表影响的强弱,虚线表示关系不显著,** $P < 0.01$ 表示极显著影响,* $P < 0.05$ 表示显著影响

壤性质不仅是植物生长发育的物质和能量来源,还是影响植物功能性状的主导因子^[38]。相关性分析表明根长和根冠比与土壤理化性质显著相关,说明土壤性质对植物的影响主要是通过调控根系对资源获取的途径,进而影响植物生长和留存的权衡关系^[39]。在土壤养分富足的环境中,植物能够快速吸收营养用于迅速生长,相对应的在功能性状方面就会表现出比较高的光合速率、呼吸速率和较小的根冠比等;然而在养分较为缺乏的环境中,植物为了获取生长所必需的营养就会在功能性状方面表现出较高的比根长和根系深度以及较大的根冠比等,同时这些功能性状也有利于保留土壤中的养分^[40]。这一解释在本研究中也得到证实,相关分析表明根长与大多数养分都呈负相关关系(表2)。相关研究表明,土壤有机质也是影响植物功能性状的重要因子^[38,41—42]。土壤有机质的来源主要是枯枝落叶、动植物和微生物残体,经过微生物分解后进入土壤并使土壤有机质含量发生变化,进而影响植物功能性状。朋措吉等^[38]的研究表明,在纯草本群落中,土壤有机质含量是影响植物功能性状的主导影响因子。这与本研究的结果相似,本研究中土壤有机碳含量与根长呈显著正相关关系(表2)。土壤速效氮和氨态氮与根长和根冠比显著负相关,这主要是因为旱地生态系统中,氮素是植物生产力的主要限制因素,植物通过增加根长使根表面积增加,进而使其能够获取足够的氮素。

不同类型土壤的根际效应也存在差异,这主要是由于土壤性质差异所致。灰钙土和黑垆土的土壤速效氮、速效磷和速效钾等理化性质显著高于风沙土(图1),因而蒙古冰草在灰钙土和黑垆土中的根际效应也显著小于风沙土(图2)。值得注意的是,在灰钙土和黑垆土中,速效氮和氨态氮的根际效应均为正效应,而在风沙土中则为负效应,这说明在风沙土中植物的根际效应使土壤形成了所谓的土壤疲劳^[19],这将会加剧干旱生态系统土壤氮素缺乏对生产力的限制。土壤质地也是根际效应的重要影响因素,灰钙土和黑垆土紧实的土壤质地使得它们中的土壤孔隙以微小孔隙为主^[31],一定程度上限制了水-气平衡进而抑制了根际效应。然而,松散的风沙土则以大孔隙为主^[31],水-气平衡条件的改善有利于根际微生物等的生存和繁殖,进而也有利于根际沉积。

植物功能性状决定了根际效应的大小(表3,图3)。相关性分析表明,根际效应大小主要与根系长度和根冠比密切相关(表3)。根际效应是根系释放和沉积有机和矿物化合物的结果^[43],植物通过根系将光合产物源源不断的送入土壤,因此,植物光合作用大小和根系性状是根际效应的直接影响因素。光合作用大小与植物自身形态特征密切相关,本研究中根冠比与根际效应呈负相关关系,这主要是因为较小的地上部分的光合能力和光合产物有限,能输入到土壤的物质也较少;而较大的地上部分具有较强的光合能力,能产生较多的光合产物,因而根系向土壤输入的分泌物也就较多。根系长度与根际效应也呈负相关关系,这可能是因为根

系越长,根际效应对土壤的影响深度越深,一定程度上稀释了根际效应的影响。此外,根系直径也是影响根际效应的重要因子,根系直径越小,其比表面积越大,它向单位土壤中输入的有机和矿质分泌物就越多,因而对土壤的影响也越强。

4 结论

蒙古冰草的功能性状在不同土壤之间存在差异,主要表现在根长和根冠比上。不同类型土壤中的根际效应存在差异,总体表现为风沙土中最大,灰钙土中最小。蒙古冰草的功能性状与土壤理化性质和根际效应大小密切相关。不同土壤中的功能性状和根际效应的差异主要是由于土壤理化性质的差异所致。土壤理化性质的差异分别解释了蒙古冰草根长、根冠比和根际效应变异的 36%、1% 和 64%。

参考文献 (References):

- [1] 孟婷婷,倪健,王国宏. 植物功能性状与环境 and 生态系统功能. 植物生态学报, 2007, 31(1): 150-165.
- [2] 郑颖,温仲明,宋光,丁曼. 环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响. 生态学报, 2014, 34(10): 2682-2692.
- [3] Diaz S, Cabido M, Casanoves F. Plant functional traits and environmental filters at a regional scale. *Journal of vegetation science*, 1998, 9(1): 113-122.
- [4] Cornelissen J, Lavorel S, Garnier E, Díaz S, Buchmann N, Gurvich D, Reich P, Steege H, Morgan H, Heijden M, Pausas J, Poorter H. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51: 335-380.
- [5] Violle C, Navas M L, Vile D, Kazakou E, Fortunel C, Hummel I, Garnier E. Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 2007, 116(5): 882-892.
- [6] Messier J, McGill B J, Lechowicz M J. How do traits vary across ecological scales? A case for trait-based ecology. *Ecology Letters*, 2010, 13(7): 838-848.
- [7] Albert C H, de Bello F, Boulangeat I, Pellet G, Lavorel S, Thuiller W. On the importance of intraspecific variability for the quantification of functional diversity. *Oikos*, 2012, 121(1): 116-126.
- [8] 施宇,温仲明,龚时慧,宋光,郑颖,丁曼. 黄土丘陵区植物功能性状沿气候梯度的变化规律. 水土保持研究, 2012, 19(1): 107-111 +116.
- [9] 龚时慧,温仲明,施宇. 延河流域植物群落功能性状对环境梯度的响应. 生态学报, 2011, 31(20): 6088-6097.
- [10] Venn S E, Green K, Pickering C M, Morgan J W. Using plant functional traits to explain community composition across a strong environmental filter in Australian alpine snowpatches. *Plant Ecology*, 2011, 212(9): 1491-1499.
- [11] 刘旻霞,马建祖. 阴阳坡植物功能性状与环境因子的变化特征. 水土保持研究, 2013, 20(1): 102-106.
- [12] Jager M M, Richardson S J, Bellingham P J, Clearwater M J, Laughlin D C. Soil fertility induces coordinated responses of multiple independent functional traits. *Journal of Ecology*, 2015, 103(2): 374-385.
- [13] Wright I J, Reich P B, Cornelissen J H C, Falster D S, Groom P K, Hikosaka K, Lee W, Lusk C H, Niinemets Ü, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Warton D I, Westoby M. Modulation of leaf economic traits and trait relationships by climate. *Global Ecology and Biogeography*, 2005, 14(5): 411-421.
- [14] 刘玉平,刘贵峰,达福白乙拉,程伟燕,陈志婧,姜丽丽. 地形因子对大青沟自然保护区不同森林群落叶性状的影响. 林业科学, 2017, 53(3): 154-162.
- [15] Pausas J G, Bradstock R A, Keith D A, Keeley J E. Plant functional traits in relation to fire in crown-fire ecosystems. *Ecology*, 2004, 85(4): 1085-1100.
- [16] 李西良,刘志英,侯向阳,吴新宏,王珍,胡静,武自念. 放牧对草原植物功能性状及其权衡关系的调控. 植物学报, 2015, 50(2): 159-170.
- [17] Kühner A, Kleyer M. A parsimonious combination of functional traits predicting plant response to disturbance and soil fertility. *Journal of Vegetation Science*, 2008, 19(5): 681-692.
- [18] Schellberg J, Pontes L D S. Plant functional traits and nutrient gradients on grassland. *Grass and Forage Science*, 2012, 67(3): 305-319.
- [19] Korniłowicz-Kowalska T, Andruszczak S, Bohacz J, Kraska P, Możejko M, Kwiecińska-Poppe E. The effect of tillage and no-tillage system on culturable fungal communities in the rhizosphere and soil of two spelt cultivars. *Applied Soil Ecology*, 2022, 174: 104413.
- [20] Kuzyakov Y, Xu X. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: mechanisms and ecological relevance. *New Phytologist*, 2013, 198(3): 656-669.

- [21] Cheng W, Parton W J, Gonzalez-Meler M A, Phillips R, Asao S, McNickle G G, Brzostek E, Jastrow J D. Synthesis and modeling perspectives of rhizosphere priming. *New Phytologist*, 2014, 201(1): 31-44.
- [22] Finzi A C, Abramoff R Z, Spiller K S, Brzostek E R, Darby B A, Kramer M A, Phillips R P. Rhizosphere processes are quantitatively important components of terrestrial carbon and nutrient cycles. *Global change biology*, 2015, 21(5): 2082-2094.
- [23] Gan D, Zeng H, Zhu B. The rhizosphere effect on soil gross nitrogen mineralization: a meta-analysis. *Soil Ecology Letters*, 2022, 4(2): 144-154.
- [24] Li W J, Li Y, Lv J, He X M, Wang J L, Teng D X, Jiang L M, Wang H F, Lv G H. Rhizosphere effect alters the soil microbiome composition and C, N transformation in an arid ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 2022, 170: 104296.
- [25] Nakayama M, Tateno R. Rhizosphere effects on soil extracellular enzymatic activity and microbial abundance during the low-temperature dormant season in a northern hardwood forest. *Rhizosphere*, 2022, 21: 100465.
- [26] Sun Y, Xu X L, Kuzyakov Y. Mechanisms of rhizosphere priming effects and their ecological significance. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(1): 62-75.
- [27] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [28] Hou E, Luo Y, Kuang Y, Chen C, Lu X, Jiang L, Luo X Z, Wen D. Global meta-analysis shows pervasive phosphorus limitation of aboveground plant production in natural terrestrial ecosystems. *Nature communications*, 2020, 11(1): 1-9.
- [29] Jones D L, Hodge A, Kuzyakov Y. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New phytologist*, 2004, 163(3): 459-480.
- [30] Liu S, He F, Kuzyakov Y, Xiao H, Hoang D T T, Pu S, Razavi B S. Nutrients in the rhizosphere: A meta-analysis of content, availability, and influencing factors. *Science of The Total Environment*, 2022, 826: 153908.
- [31] 陶利波, 王建军, 王国会, 于双, 李惠惠, 许冬梅. 封育对宁夏荒漠草原土壤有机碳矿化的影响. *浙江农业学报*, 2017, 29(09): 1549-1554.
- [32] 张鹏, 沈艳, 张小菊, 聂明鹤, 温华晨, 马红彬. 宁夏荒漠草原优势植物叶片 C、N、P 生态化学计量特征及群落稳定性研究. *中国草地学报*, 2022, 44(06): 18-26.
- [33] 聂明鹤, 沈艳, 陆颖, 王科鑫, 张小菊. 宁夏盐池县荒漠草原区不同群落优势植物叶片-土壤生态化学计量特征. *草地学报*, 2021, 29(01): 131-140.
- [34] 薛英龙, 李春越, 王益, 苗雨, 常顺. 农业利用对毛乌素沙地土壤碳氮含量及微生物量的影响. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10): 2325-2335.
- [35] Jackson M. *Soil Chemical Analysis: Advanced Course*. Englewood Cliffs, USA: Prentice-Hall, 1969.
- [36] Zhang T, Jia R L, Yu L Y. Diversity and distribution of soil fungal communities associated with biological soil crusts in the southeastern Tengger Desert (China) as revealed by 454 pyrosequencing. *Fungal Ecology*, 2016, 23: 156-163.
- [37] Zhao X, Tian P, Sun Z, Liu S, Wang Q, Zeng Z. Rhizosphere effects on soil organic carbon processes in terrestrial ecosystems: A meta-analysis. *Geoderma*, 2022, 412: 115739.
- [38] 朋措吉, 宋明华, 周春丽, 李以康, 李小娟, 曹广民. 放牧影响下不同盖度金露梅灌丛草本植物叶功能性状与土壤因子的关系. *西北植物学报*, 2020, 40(5): 870-881.
- [39] Wright I J, Reich P B, Westoby M, Ackerly D D, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen J H C, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom P K, Gulias J, Hikosaka K, Lamont B B, Lee T L, Lee W, Lusk C, Midgley J J, Navas M L, Niinemets Ü, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov V I, Roumet C, Thomas S C, Tjoelker M G, Veneklaas E J, Villar R. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 2004, 428(6985): 821-827.
- [40] 王炜, 梁存柱, 刘钟龄, 郝敦元. 草原群落退化与恢复演替中的植物个体行为分析. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 268-274.
- [41] 卜文圣, 臧润国, 丁易, 张俊艳, 阮云泽. 海南岛热带低地雨林群落水平植物功能性状与环境因子相关性随演替阶段的变化. *生物多样性*, 2013, 21(3): 278-287.
- [42] 段媛媛, 宋丽娟, 牛素旗, 黄婷, 杨改河, 郝文芳. 不同林龄刺槐叶功能性状差异及其与土壤养分的关系. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 28-36.
- [43] Hunter P J, Teakle G R, Bending G D. Root traits and microbial community interactions in relation to phosphorus availability and acquisition, with particular reference to *Brassica*. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 27.