

DOI: 10.5846/stxb202006171581

胡冬, 吕光辉, 王恒方, 杨启, 蔡艳. 水分梯度下荒漠植物多样性与稳定性对土壤因子的响应. 生态学报, 2021, 41(17): 6738-6748.

Hu D, Lü G H, Wang H F, Yang Q, Cai Y. Response of desert plant diversity and stability to soil factors based on water gradient. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6738-6748.

水分梯度下荒漠植物多样性与稳定性对土壤因子的响应

胡 冬^{1,2}, 吕光辉^{1,2,*}, 王恒方^{1,2}, 杨 启^{1,2}, 蔡 艳^{1,2}

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要: 荒漠生态系统多样性的研究对维持荒漠区群落稳定性有着重要意义。以艾比湖流域荒漠植物群落为研究对象, 基于野外样方调查数据及实验分析, 探讨不同水分梯度下植物多样性与稳定性的变化规律及土壤因子对二者的影响。结果表明: (1) 随土壤水分含量下降, Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 多样性指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)、Margalef 丰富度指数(R)和种群密度稳定性(ICV)指数均呈下降趋势, 且当土壤含水量低于 4.65% 时, 荒漠植物多样性与群落稳定性总体显著降低 ($P < 0.05$); (2) 不同水分梯度下影响艾比湖流域植物多样性的土壤因子具有差异性, 高水梯度为硝态氮与有机质, 中水梯度下影响植物多样性的因子为 pH, 低水梯度为全氮和有机质; (3) 仅在环境适宜的情况下, 土壤因子(土壤含盐量与有机质)才能对群落稳定性产生显著影响 ($P < 0.01$); (4) 三种梯度下, 物种多样性均对群落稳定性有显著性影响 ($P < 0.001$), 植物多样性与群落稳定性存在正相关关系。

关键词: 荒漠生态系统; 植物多样性; 群落稳定性; 土壤因子

Response of desert plant diversity and stability to soil factors based on water gradient

HU Dong^{1,2}, LÜ Guanghui^{1,2,*}, WANG Hengfang^{1,2}, YANG Qi^{1,2}, CAI Yan^{1,2}

1 College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China

Abstract: Study of desert ecosystem diversity is of great significance for maintaining the stability of desert communities. As an important component of biodiversity, plant diversity plays an important role in maintaining the function and stability of community ecosystem. In arid and semi-arid areas, the increase in drought will have an important impact on plant diversity, which in turn will affect the stability of the community. Therefore, soil water content is a key factor affecting the diversity and community stability of desert plant. We studied the changes of plant diversity, community stability and other soil factors along the soil water gradient in Ebinur Lake basin. From July to August in 2017, a 30 m×3600 m transect was established north of the Aqikesu River and divided into sixty 30 m×30 m quadrats. In each plot, plant abundance, height, and diameter at breast height were recorded. Soil characteristics were analyzed, including water content(WC), soil pH(pH), soil salinity(SA), soil organic matter(SOM), total nitrogen(TN), total phosphorus(TP), available phosphorus(AP), and nitrate nitrogen(NN). Firstly, the sampling plots were divided into three water gradients by cluster analysis and included high water(W1), middle water(W2), and low water(W3) gradients. Secondly, we studied the changes of plant

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560131)

收稿日期: 2020-06-17; 网络出版日期: 2021-06-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ler@xju.edu.cn

diversity, community stability and other soil factors along the soil water gradient. Finally, we screened the soil factors and added them to the structural equation model (SEM) to discuss the main soil factors affecting plant diversity and community stability under different water gradients. The results showed that: (1) with the decrease of soil water content, Shannon-Wiener index (H), Simpson index (D), Pielou index (J), Margalef index (R) and Inverse coefficient of population density variation (ICV) all showed a downward trend. Moreover, when the soil water content was lower than 4.65%, the overall diversity and community stability of desert plants decreased significantly ($P < 0.05$); (2) There are differences in soil factors affecting plant diversity under different water gradients. The high water gradients were soil nitrate nitrogen and soil organic matter, medium water gradients were soil pH, and low water gradients were soil total nitrogen and soil organic matter; (3) Soil factors (soil salinity and organic matter) have a significant impact on community stability only the soil environment is appropriate ($P < 0.01$); (4) Species diversity has significant effects on community stability under three gradients ($P < 0.001$). There was a positive correlation between plant diversity and community stability. The research results are of great significance to the restoration of vegetation diversity and community stability in the study area.

Key Words: desert ecosystem; plant diversity; community stability; soil factors

半个世纪以来,物种多样性和生态系统稳定性之间的关系一直是生态学具有争议的问题^[1-6]。生态系统稳定性是物种多样性、环境条件、外界扰动等因素共同作用的结果^[7]。作为生物多样性的重要组成部分,植物多样性在维持群落生态系统功能及其稳定性中起着至关重要的作用^[8-9],而植物多样性受到诸多环境因子的影响,如气候^[10],土壤^[11]和水环境^[12]等。其中土壤作为植物生长繁育的必要条件之一,植物群落的类型与分布都会受到土壤养分状况及其理化性质的影响^[13]。对于干旱区半干旱区而言,许多植物都处于干旱胁迫下,水分成为植物生长发育的主要限制因子之一^[12]。根据 IPCC^[14]预测,近年来由于极端气候事件的频繁发生,陆地生态系统的干旱程度和频率将会继续增加。在干旱区和半干旱区,干旱程度的增加将对植物多样性产生重要影响,进而影响群落的稳定性^[15]。因此,基于不同水分梯度,探究荒漠植物多样性与群落稳定性之间的关系,以及主要影响植物多样性与群落稳定性的土壤因子,将为干旱半干旱区植物多样性的保护与群落稳定性的维持提供理论依据。

近年来,由于生物多样性急剧下降,越来越多的国内外学者开展了关于植物多样性方面的研究^[16]。其中,植物多样性沿环境梯度的空间变化已经是多样性研究的基本问题^[17]。荒漠生态系统因其特殊的地理环境,生态环境十分脆弱,一旦遭到破坏就很难恢复^[18]。现有研究发现不同荒漠生态系统植物组成、分布格局、丰富度和多样性特征均会随水分梯度的变化而变化^[19-21]。同时,有关环境因子对稳定性影响的研究结果表明,短期的环境改变如极端干旱可以增加群落生产力,进而暂时增加群落的稳定性^[22]。Hallett 等发现高降水量的地区,其群落稳定性较高^[23]。目前关于生物多样性—稳定性关系的研究结果表明,二者之间存在正相关^[24-25]、负相关^[26]和非线性^[27]的关系,并没有一致的结论。综上所述,前人的研究主要集中在环境因子对植物多样性或群落稳定性的影响,而将二者结合的研究甚少,且关于生物多样性与群落稳定性的关系尚存在争议。因此,很有必要在荒漠区开展不同水分梯度下植物多样性与群落稳定性相关关系的研究,以期揭示物种在不同水分梯度下与土壤因子的作用机制。

艾比湖流域属于典型的干旱内陆河流域,位于流域内的阿其克苏河两岸,水分梯度明显,并且其土壤水分含量表现出随着离河岸距离增大而减小的趋势^[28]。因此,本文以艾比湖流域荒漠植物群落为研究对象,探讨不同水分梯度下植物多样性与稳定性对土壤因子的响应,旨在解决以下问题:(1)植物多样性与稳定性对水分梯度的响应及二者之间的关系;(2)不同水分梯度下影响植物多样性和群落稳定性的主要土壤因子有哪些?上述问题的研究将有助于了解荒漠植物多样性沿土壤水分梯度的变化规律及群落稳定性的维持机制,以期为艾比湖流域植被恢复及生态管理等提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

艾比湖国家级湿地自然保护区(E82°33′—83°53′, N44°31′—45°09′)位于新疆精河县西北部(图1)。该区域年均气温5℃,年均降水量约100 mm,年均蒸发量1300 mm左右,属于典型的温带大陆性干旱气候^[29]。该地区荒漠旱生植物物种较为丰富,主要植物种类有胡杨(*Populus euphratica*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、芦苇(*Phragmites australis*)、红砂(*Reaumuria soongarica*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等。

1.2 研究区样点选取

在艾比湖湿地国家级自然保护区的荒漠区内,垂直于阿其克苏河,形成了一条自然的水盐梯度,垂直于河道由近到远,土壤水分和盐分形成递减梯度变化。在东大桥管护站以北设置样地,样地东西相距30 m,南北相距3600 m,将30 m×3600 m样带平均划分为60个30 m×30 m样方(图1)。

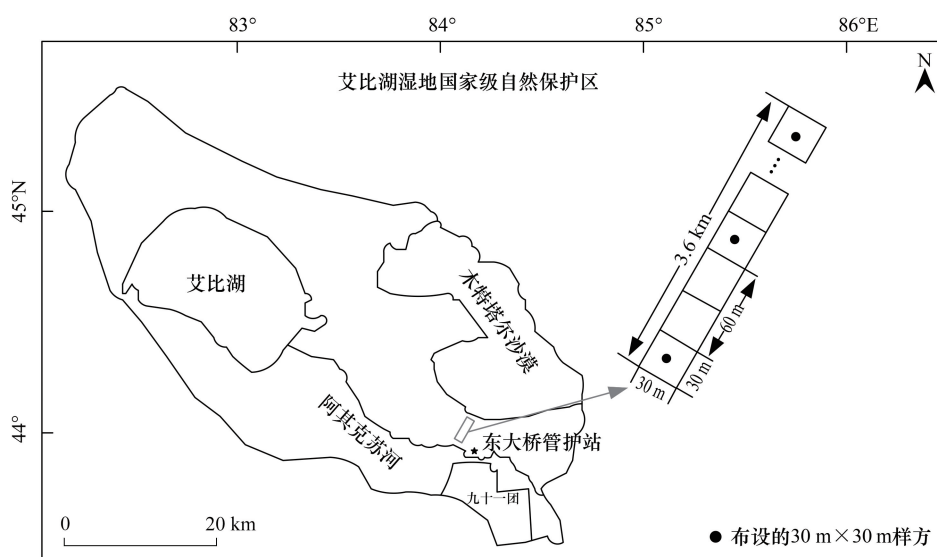


图1 研究区位置及样方分布示意图

Fig.1 Location of the study area and the investigated plots

1.3 样方调查及样品采集

(1)记录30 m×30 m的样方中所有乔木的多度,其中灌木的调查是在每个乔木样方的对角线上选取3个5 m×5 m灌木样方,草本植物的基本记录是在乔木样方的两条对角线上随机选取4个1 m×1 m的草本样方。此外,记录样方内种类组成、多度、植株高度,乔木和灌木测量其胸径/基径。利用GPS记录每个样地的经纬度和海拔。

(2)在植物生长旺盛的7月至8月,在样方内裸地土部分,用“S”采样法选取土壤采样点,钻取0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm土样,先用铝盒均匀采集土样,用于测定含水量,另取一份均匀混合好的土样约1 kg,装入密封袋中封口编号,带回实验室风干待测。测量的土壤指标包括土壤含水量(Soil water content, WC)、含盐量(Soil salt content, SC)、有机质(Soil organic matter, SOM)、全磷(Soil total phosphorus, TP)、全氮(Soil total nitrogen, TN)、速效磷(Soil available phosphorus, AP)、硝态氮(Soil nitrate nitrogen, NN)指标。其中,土壤含盐量是由电导率根据经验公式推导而来。具体测定方法如表1。

表 1 土壤指标及其测定方法		
Table 1 Soil index and determination method		
土壤因子 Soil factors	方法 Method	所用仪器 Instrument
含水量 Water content	烘干法	烘箱, 万分之一天平
pH	玻璃电极法	pH 计
电导率 Electrical conductivity	精密电导仪	电导率仪
有机质 Soil organic matter	重铬酸钾法	—
全磷 Total phosphorus	钼锑抗比色法	分光光度计
全氮 Total nitrogen	凯氏定氮法	凯氏定氮仪
速效磷 Available phosphorus	分光光度计法	分光光度计
硝态氮 Nitrate nitrogen	紫外分光光度法	紫外可见分光光度计

1.4 土壤水分梯度划分

由于采样数据的丢失,在剔除 3 个样方的基础上通过聚类分析将 57 个样方划分成 3 种水分梯度(表 2),分别为高水梯度(W1)、中水梯度(W2)和低水梯度(W3)。

表 2 各水分梯度的土壤水分含量基本统计值						
Table 2 Basic statistics of soil water content in different moisture gradient						
水分梯度 Moisture gradient	样方数 Number of plot	均值 Mean/%	标准差 Stand deviation	极小值 Min/%	极大值 Max/%	变异系数 Coefficient of variation/%
W1	10	17.10a	3.03	12.69	22.48	17.72
W2	22	7.84b	1.58	5.46	10.31	20.14
W3	25	2.56c	1.34	0.81	4.65	52.22

W1、W2 和 W3 分别代表文中高、中、低土壤水分梯度,第三列数据后小写英文字母不同者表示数据间差异极显著($P<0.05$),表中统计数据均为土壤水分含量值

1.5 植物多样性与稳定性的计算

为了探讨不同水分梯度下物种多样性与群落稳定性的变化情况,本文选取了 4 个多样性指数和 1 个稳定性指数,分别为 Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 多样性指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)、Margalef 丰富度指数(R)和种群密度稳定性指数(ICV)。计算方法如下:

(1)多样性指数的计算

①Margalef 丰富度指数:

$$R=(S-1)/\log_2N$$

②物种多样性指数

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H=-\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

Simpson 多样性指数:

$$D=1-\sum_{i=1}^s N_i^2$$

③Pielou 均匀度指数

$$J=H/\ln(S)$$

式中, $P_i=N_i/N$,表示某样方中第*i*个种的相对多度; N 为某样方中所有物种个体数之和。 N_i 为某样方中物种*i*的重要值, S 为样方中总的物种数。

(2)群落稳定性计算方法

利用物种种群密度变异系数(coefficient of variation,CV)的倒数 ICV 表示^[20-22]:

$$ICV = \frac{\mu}{\sigma}$$

式中, μ 为样方内每个物种的平均密度, σ 为每个物种密度的标准差。ICV 值越大, 群落稳定性越高, 也表示各物种密度的变异性较小。

1.6 结构方程模型的构建

由于本研究变量较多, 且需要探讨多个变量之间的关系, 故选用结构方程模型分析土壤因子、植物多样性与群落稳定性之间的关系。结构方程模型 (structure equation modeling, SEM) 是应用线性方程系统表示各变量之间关系的一种统计方法。和传统的线性回归模型 (general linear model, GLM) 相比, SEM 的优点表现为可以同时处理多个变量, 而且可以在一个模型中同时处理因素的测量关系和因素之间的关系^[30]。

在构建模型之前, 需要一个先验假设。根据已知的土壤因子与植物多样性、植物多样性与群落稳定性之间的因果关系, 构建初始模型。假设: (1) 土壤因子在决定生物因子中起着基础性作用; (2) 土壤因子直接影响物种多样性; (3) 土壤因子和物种多样性能够直接影响群落稳定性。

因变量较多, 结构方程模型不易收敛, 故逐个加入土壤因子和多样性指标构建结构方程模型, 构建出最优模型。在评价模型优度时, 选用比较拟合指数 (CFI > 0.9)、标准均方根残差 (SRMR < 0.05)、渐进残差均方和平方根 (RMSEA < 0.08)、显著性概率值 ($P > 0.05$) 等指标^[31]。最终选取 Simpson 指数代表物种多样性, 土壤 pH、含盐量、速效磷、硝态氮 (低水梯度下为全氮)、有机质作为土壤因子, 构建出最优结构方程模型。利用模型中各路径标准化系数, 定量表示不同因素对群落稳定性的相对作用大小。上述分析利用 AMOS 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同水分梯度下土壤因子特征

不同水分梯度间, 土壤含盐量 (SC)、全氮 (TN)、硝态氮 (NN)、全磷 (TP)、速效磷 (AP)、有机质含量 (SOM)、pH 的差异显著 ($P < 0.01$) (图 2)。土壤含盐量在低水梯度 (W3) 显著低于中水梯度 (W2) 和高水梯度 (W1), 其变化范围在 1.24%—8.56% 之间; 其余土壤因子在 3 种水分梯度间差异均极显著 ($P < 0.01$), 且随着水分梯度的降低呈减小趋势。其中, 全磷含量的变化范围在 0.31—1.28 g/kg 之间; 有机质含量的变化范围在 0.45—18.16 g/kg 之间, 速效磷含量的变化范围为 6.81—59.01 mg/kg, pH 在 7.20—8.67 之间变化, 而土壤全氮含量与硝态氮的变化范围较大, 两者的变化范围分别为 0.043—1.65 g/kg、0.10—42.53 mg/kg。

2.2 不同水分梯度下物种多样性与群落稳定性及二者之间的关系

4 种多样性指数和稳定性指数的变化趋势基本一致 (图 3), 即随着土壤水分梯度的降低, 多样性与稳定性都表现出下降的趋势。具体来说, 从 W1 到 W2, Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Simpson 多样性指数 (D)、Pielou 均匀度指数 (J)、Margalef 丰富度指数 (R) 和种群密度稳定性 (ICV) 指数呈下降趋势, 但无显著性差异 ($P > 0.05$); 至 W3, 5 种指数均出现了极显著下降 ($P < 0.01$)。上述结果表明, 多样性指数和稳定性指数在低水梯度整体极显著降低, 即土壤水分含量为 0.81%—4.65% 时对荒漠植物多样性和稳定性影响较大。

回归分析 (图 4) 显示, 在 3 种土壤水分梯度下, 物种多样性与群落稳定性均呈现极显著正相关 ($P < 0.01$), 拟合优度分别为 0.883、0.963 和 0.969; 即群落稳定性随着物种多样性的增加而呈现出增大的趋势。

2.3 植物多样性及稳定性与土壤因子的关系

结构方程模型 (SEM) 结果表明, 不同土壤含水量梯度下, 影响植物多样性与群落稳定性的土壤因子具有差异性。在三种梯度下, 植物多样性对群落稳定性均具有极显著正影响 ($P < 0.01$), 直接效应分别为 0.951、0.964 和 0.924。在高水梯度 (图 5) 下, 土壤硝态氮对植物多样性有显著性直接影响 ($P < 0.01$), 其直接效应为 -0.908; 土壤有机质对植物多样性有极显著负影响 ($P < 0.01$), 直接效应为 -0.231。同时, 在群落稳定性方面, 土壤有机质与盐分含量对其有显著负影响 ($P < 0.05$), 直接效应为 -0.672; 其次, 土壤含盐量对其有极显著影响 ($P < 0.01$), 直接效应为 0.183。在中水梯度 (图 5) 下, 对植物多样性有显著影响的土壤因子只有 pH

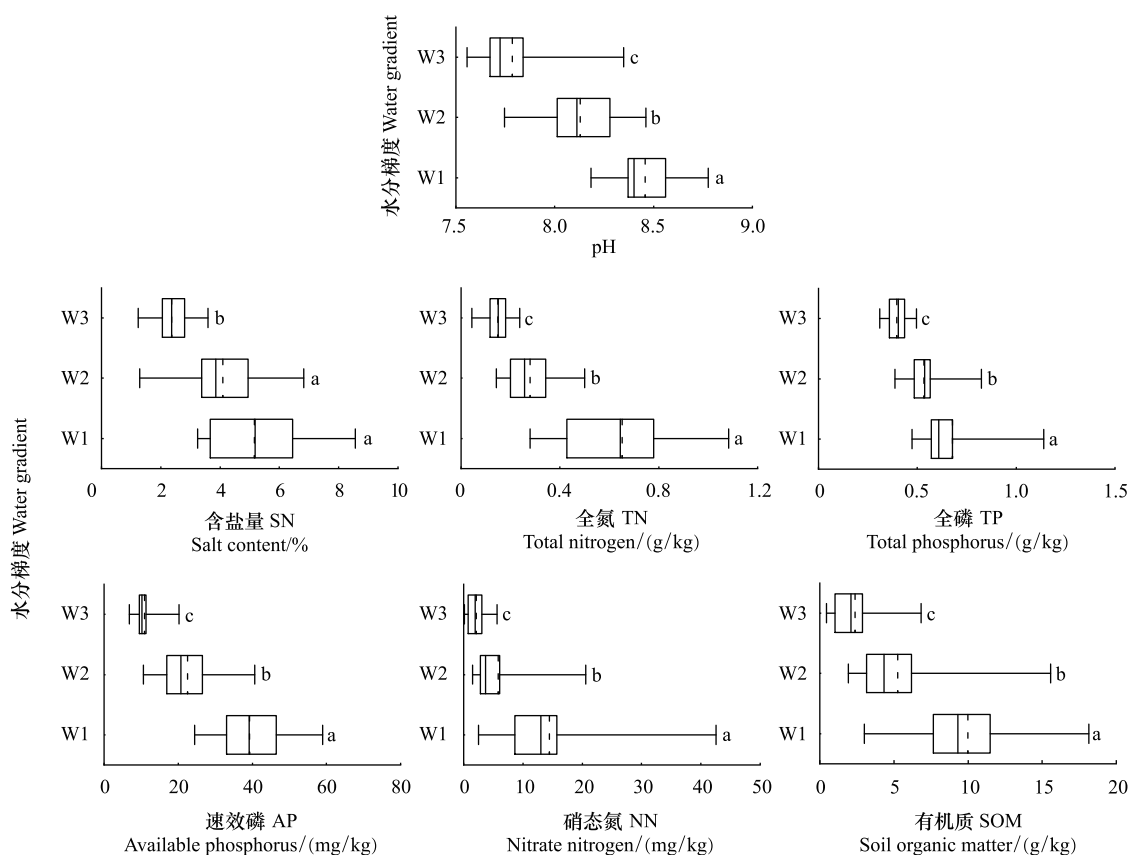


图2 不同水分梯度的土壤因子特征

Fig.2 Characteristics of soil factors under different moisture gradients

W1、W2 和 W3 分别代表文中高、中、低土壤水分梯度;箱体代表上四分位数到下四分位数,两端须线代表最值,箱体内部实线代表中位数,虚线代表平均值;相同土壤因子后不同小写字母表示数据间差异显著 ($P < 0.05$);SOM:土壤有机质,soil organic matter;AP:速效磷,available phosphorus;NN:硝态氮,nitrate nitrogen;SC:土壤含盐量,salt content;TN:全氮,total nitrogen;TP:全磷,total phosphorus

($P < 0.05$),其直接效应为 0.483;然而,土壤因子对群落稳定性均无显著影响。在低水梯度(图 5)下,对植物多样性有显著影响($P < 0.05$)的土壤因子是土壤全氮和土壤有机质,直接效应分别为-0.379 和-0.403。土壤因子对群落稳定性的影响都不显著($P > 0.05$)。综上所述,不同水分梯度下,土壤因子对植物多样性的显著影响存在差异性。

3 讨论

3.1 水分梯度下植物多样性与群落稳定性变化及二者之间的关系

在荒漠地区,土壤水分是影响生态-水文过程的关键因子^[19],而植物多样性对水分条件变化的响应直接影响着荒漠生态系统的稳定性^[32]。水分条件一旦恶化,植物群落就会向着物种组成减少、结构简单、植株矮小、分布稀疏和生产力降低的方向发展,生态系统功能退化,从而使植物多样性与群落稳定性下降^[33-35]。本研究发现,Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性

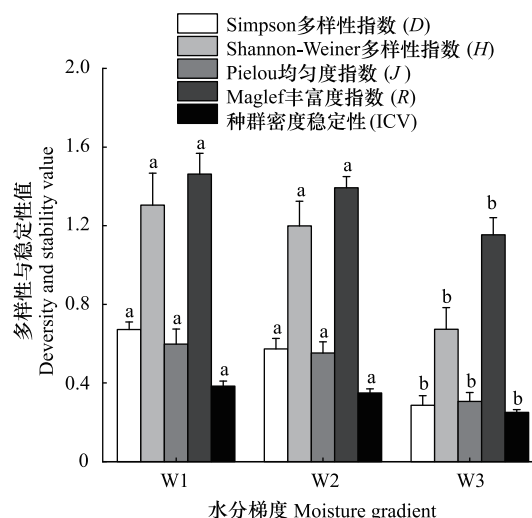


图3 各土壤水分梯度的植物多样性指数和稳定性指数

Fig.3 Plant diversity indices and stability indices of different soil moisture gradient

误差线为标准误差;误差线上同一个多样性指数后小写英文字母不同表示数据间有极显著差异 ($P < 0.01$)

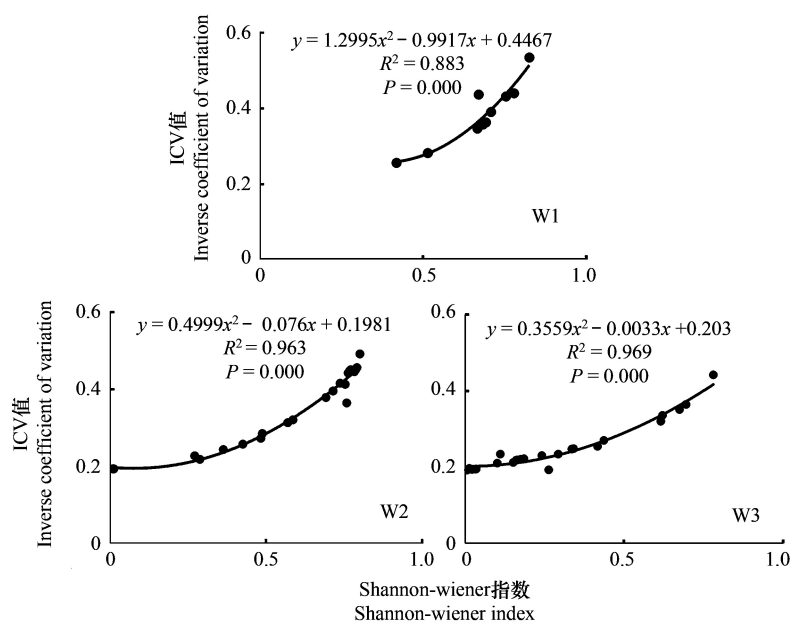


图4 各土壤水分梯度下物种多样性与稳定性线性回归

Fig.4 The linear regression of species diversity and stability under different soil moisture gradients

指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数在三种水分梯度间具有一致的变化规律,即土壤水分含量越高,群落多样性与丰富度指数越大,表明在荒漠生态系统中,土壤水分含量是制约植物多度和丰富度的关键因子^[36-37]。王继丰等^[38]在研究三江平原湿地群落时发现,由于土壤中低的含水量会阻碍荒漠植物的生长,耐旱性较差的物种在低水梯度中消失,进而导致随水分梯度减小,其丰富度指数减小。在本研究中,虽然高水梯度与中水梯度土壤含水量差异极显著($P < 0.01$),但多样性指数与丰富度指数在两种梯度间无显著差异,说明在一定范围内,土壤含水量对植物多样性没有显著影响,相关研究结果也证实了这一观点^[39-40]。然而,低水梯度下的生物多样性与高、中水梯度下有极显著差异($P < 0.01$),这可能是由于在中、高水梯度(7.84%—17.10%)时,植物生长不受含水量的限制,但当含水量继续下降(<7.84%),植物生长开始受限,大多数植物受到水分胁迫,随之消失,对此也有相似观点^[20-21,41]。

在干旱区内,种间竞争、环境压力和干扰活动都会对群落稳定性产生影响^[42]。ICV 值越大,群落稳定性越大,即各物种密度的变异性较小^[43-45]。本研究发现,三种梯度稳定性的排序为:高水梯度>中水梯度>低水梯度,这与王恒方等^[46]对艾比湖不同水盐梯度下群落稳定性的研究结果一致。其他研究结果显示,在水分相对充足的情况下,多数植物都能够很好的存活,所以其多样性与稳定性较高;当含水量较低时,限制了某些物种的生长,群落稳定性随之下降^[31]。

实验生态学家通过统计得出,多样性和稳定性的关系大致可以分为3类:正相关、负相关和非线性关系^[47]。近年来,许多生态学家开展了大量群落稳定性的实验,大部分研究结果表明植物多样性与群落稳定性之间存在正相关关系^[48-50]。另有研究表明,在水分胁迫的环境下,群落更加脆弱,因此更加依赖于物种多样性去维持群落稳定性^[51]。本研究中,从结构方程模型和物种多样性与群落稳定性的回归分析结果可以看出,不同水分梯度下,群落稳定性与植物多样性均呈现极显著正相关关系($P < 0.01$),并且在胁迫环境下,物种多样性对群落稳定性的影响更大。

3.2 植物多样性及群落稳定性与土壤因子的关系

植物生长繁育离不开土壤,植物群落的种类与分布都受土壤养分状况及其理化性质的影响^[52]。本研究中,不同水分梯度下,对植物多样性有显著影响的土壤因子存在差异性。高水梯度下是土壤硝态氮和土壤有机质;中水梯度下只有 pH;低水梯度下是土壤全氮和土壤有机质。进而表明在荒漠生态系统中,土壤氮元素、土壤有机质和土壤 pH 对植物多样性起决定作用。

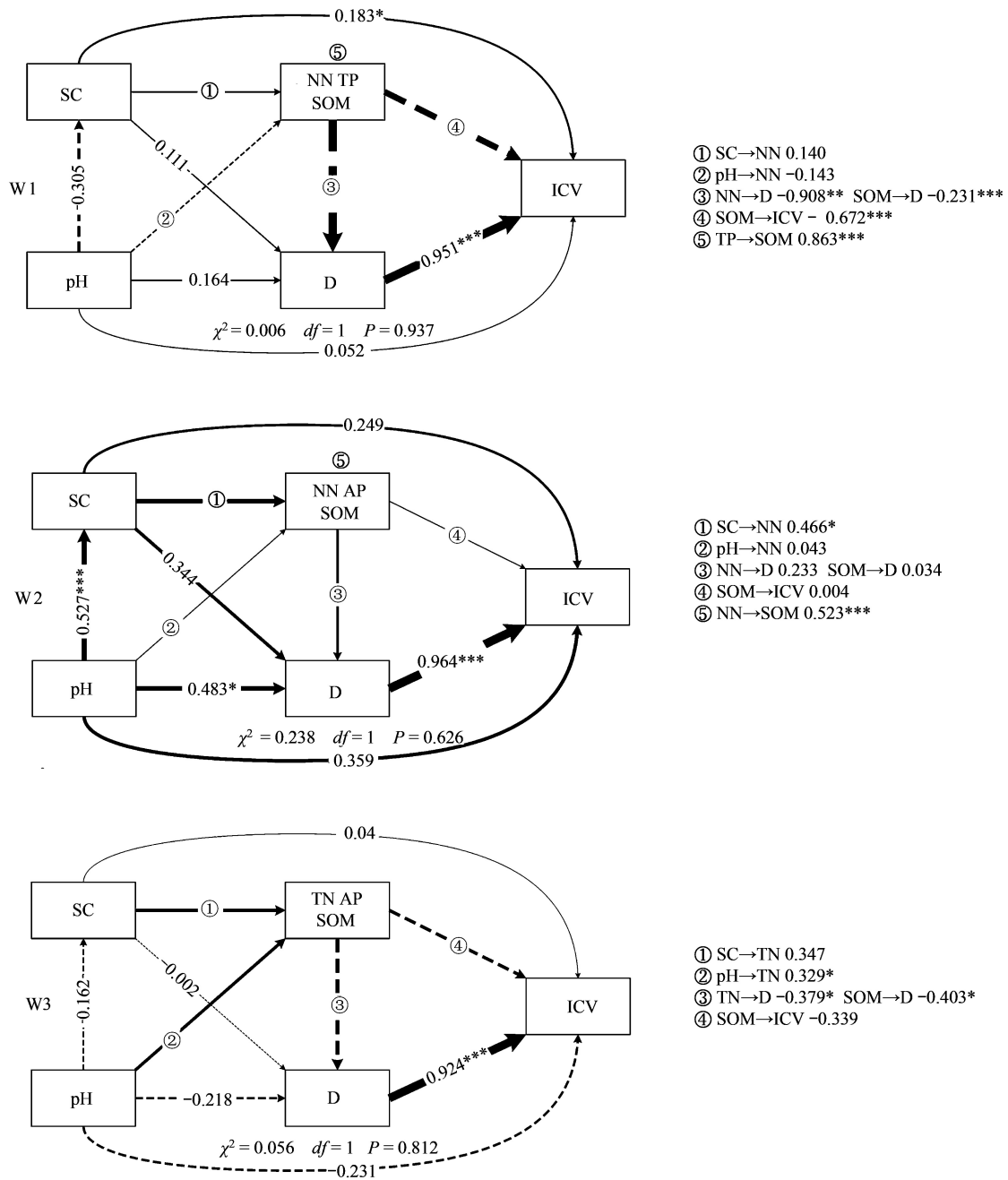


图5 各水分梯度土壤因子与植物多样性及群落稳定性的结构方程模型

Fig.5 Structural equation model for soil factors, plant diversity and community stability of different moisture gradient

图中实线和虚线分别表示正作用和负作用,箭头的宽度与作用强度成正比,箭头上的数字是标准化路径系数,***, $P < 0.001$; **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$

氮元素是所有植物生长和发育所必需的大量营养元素之一,并且在调节陆地生态系统生产量、结构和功能中起着重要作用^[53]。Strengbom 等^[54]发现,在瑞典森林中,随着土壤中氮含量的增加,生物量与多样性会急剧上升,从而加剧种间竞争。本文研究发现,在高水与低水梯度中,氮元素含量对生物多样性有极显著影响 ($P < 0.01$),同时发现高水梯度氮含量显著高于低水梯度。研究表明,在干旱区荒漠中,植物群落在生长发育过程中往往处于氮限制状态^[55-56],氮含量的缺乏会抑制植物的生长。然而在本研究中的高水梯度下,高的氮含量导致优势种生长过快,从而加剧种间竞争,抑制其他植物生长,群落结构趋向单一化^[49,57],进而植物多样

性降低。而在低水梯度中,干旱影响了植物吸收 N 的能力^[58],并且土壤含水量对植物多样性的影响大于 N 含量对植物多样性的影响^[31]。

土壤有机质含量可以较好的反映土壤肥力状况,从而影响植物生长发育及其多样性^[21]。白永飞等^[59]和李新荣等^[60]认为,土壤有机碳与群落多样性存在显著的正相关关系,但也有学者认为,在小的尺度范围内,土壤有机质和多样性指数存在负相关关系^[60]。本研究中,三个梯度的土壤有机质含量具有显著性差异,且在高、低水梯度下,土壤有机质对植物多样性有显著负影响,与肖德荣等^[61]结果相似。其原因是,土壤有机质含量较高,导致优势种数量激增,进而造成物种多样性降低^[61]。同时说明土壤有机质是影响植物群落多样性的主要土壤因子。

土壤 pH 值可以较为综合的反映土壤的化学性质,影响着土壤养分的有效性,进而影响物种多样性^[53]。欧洲生态学者发现物种多样性与 pH 值呈正相关关系^[62-63]。国内学者也发现了相似的结论^[64-65]。此研究中,在中水梯度下,pH 对物种多样性产生了极显著的影响($P < 0.01$),与前人结果相似,说明在土壤含水量适宜的情况下,植物生长发育主要受到 pH 的影响。在低水梯度下,土壤 pH 值对多样性产生了负影响,说明在一定的范围内,物种多样性随 pH 值增加而增加,但超出这一范围,会出现降低的情况,与徐治国等在研究土壤 pH 对湿地植物物种丰富度的影响的结果相似^[64]。同时,可以看出,随着土壤 pH 值的降低,物种多样性呈现出下降的趋势,说明干旱区物种能够适应较高的土壤 pH。

在干旱半干旱区,植物多样性与群落稳定性受到诸多土壤因子的影响^[28-29,66]。本研究结果表明,仅在高水梯度下,土壤因子(土壤有机质与土壤含盐量)对群落稳定性有显著影响,说明只有在环境适宜的情况下,土壤因子才能对群落稳定性产生显著影响,当条件较为恶劣时,如遭受干旱胁迫,群落稳定性并不受其他土壤因子的影响,植物的生存策略为优先保证存活。

4 结论

综上所述,艾比湖流域荒漠植物多样性与群落稳定性随土壤水分含量的降低呈现减小趋势,且二者之间存在正相关关系,说明土壤水分是导致植物多样性与群落稳定性下降的关键因素。此外,不同水分梯度下,对植物多样性和群落稳定性有显著影响的土壤因子存在差异性,说明干旱区植物在不同的环境中有其特殊的生存策略。艾比湖流域荒漠植物群落中,植物多样性与群落稳定性存在正相关关系,即物种丰富的群落较物种贫乏的群落具较高的稳定性。因此,保护植物多样性对荒漠生态系统的恢复与维持具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] May R M. Stability and Complexity in Model Ecosystems. Princeton: Princeton University Press, 1973.
- [2] Tilman D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 1994, 367(6461): 363-365.
- [3] Lehman C L, Tilman D, Gaines S D. Biodiversity, stability, and productivity in competitive communities. *The American Naturalist*, 2000, 156(5): 534-552.
- [4] Pfisterer A B, Schmid B. Diversity-dependent production can decrease the stability of ecosystem functioning. *Nature*, 2002, 416(6876): 84-86.
- [5] Isbell F I, Polley H W, Wilsey B J. Biodiversity, productivity and the temporal stability of productivity: patterns and processes. *Ecology Letters*, 2009, 12(5): 443-451.
- [6] 张景慧, 黄永梅. 生物多样性与稳定性机制研究进展. *生态学报*, 2016, 36(13): 3859-3870.
- [7] 张继义, 赵哈林. 植被(植物群落)稳定性研究评述. *生态学杂志*, 2003, 22(4): 42-48.
- [8] Lukács B A, Sramkó G, Molnár V A. Plant diversity and conservation value of continental temporary pools. *Biological Conservation*, 2013, 158: 393-400.
- [9] Kuiters A T. Diversity-stability relationships in plant communities of contrasting habitats. *Journal of Vegetation Science*, 2013, 24(3): 453-462.
- [10] Siefert A, Ravenscroft C, Althoff D, Alvarez-Yépiz J C, Carter B E, Glennon K L, Heberling J M, Jo I S, Pontes A, Sauer A, Willis A, Fridley J D. Scale dependence of vegetation - environment relationships: a meta-analysis of multivariate data. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(5): 942-951.
- [11] Janousek C N, Folger C L. Variation in tidal wetland plant diversity and composition within and among coastal estuaries: assessing the relative importance of environmental gradients. *Journal of Vegetation Science*, 2014, 25(2): 534-545.
- [12] Siles G, Voirin Y, Béné G B. Open-source based geo-platform to support management of wetlands and biodiversity in Quebec. *Ecological Informatics*, 2018, 43: 84-95.

- [13] Crawford J T, Stone A G. Relationships between soil composition and *Spartina alterniflora* dieback in an Atlantic salt marsh. *Wetlands*, 2015, 35(1): 13-20.
- [14] IPCC. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [15] Luo W T, Zuo X A, Ma W, Xu C, Li A, Yu Q, Knapp A K, Tognetti R, Dijkstra F A, Li M H, Han G D, Wang Z W, Han X G. Differential responses of canopy nutrients to experimental drought along a natural aridity gradient. *Ecology*, 2018, 99(10): 2230-2239.
- [16] Hautier Y, Tilman D, Isbell F, Seabloom E W, Borer E T, Reich P B. Anthropogenic environmental changes affect ecosystem stability via biodiversity. *Science*, 2015, 348(6232): 336-340.
- [17] Li S J, Su P X, Zhang H N, Zhou Z J, Xie T T, Shi R, Gou W. Distribution patterns of desert plant diversity and relationship to soil properties in the Heihe River Basin, China. *Ecosphere*, 2018, 9(7): e02355.
- [18] 赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 姜朋辉, 汪建珍. 黑河中游湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素. *地理科学*, 2013, 33(3): 363-370.
- [19] 张晓龙, 周继华, 蔡文涛, 管天玉, 高楠楠, 杜会, 姜联合, 来利明, 杨大文, 丛振涛, 郑元润. 水分梯度下黑河流域荒漠植物群落多样性特征. *生态学报*, 2017, 37(14): 4627-4635.
- [20] 许莎莎, 孙国钧, 刘慧明, 龚雪平, 郝媛媛, 张立勋. 黑河河岸植被与环境因子间的相互作用. *生态学报*, 2011, 31(9): 2421-2429.
- [21] Wu G L, Zhang Z N, Wang D, Shi Z H, Zhu Y J. Interactions of soil water content heterogeneity and species diversity patterns in semi-arid steppes on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2014, 519(partB): 1362-1367.
- [22] Yang Z L, Zhang Q, Su F L, Zhang C H, Pu Z C, Xia J Y, Wan S Q, Jiang L. Daytime warming lowers community temporal stability by reducing the abundance of dominant, stable species. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 154-163.
- [23] Hallett L M, Hsu J S, Cleland E E, Collins S L, Dickson T L, Farrer E C, Gherardi L A, Gross K L, Hobbs R J, Turnbull L, Suding K N. Biotic mechanisms of community stability shift along a precipitation gradient. *Ecology*, 2014, 95(6): 1693-1700.
- [24] Mougi A, Kondoh M. Diversity of interaction types and ecological community stability. *Science*, 2012, 337(6092): 349-351.
- [25] 姚天华. 功能多样性和功能冗余对高寒草甸群落稳定性的影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015.
- [26] Mori A S, Furukawa T, Sasaki T. Response diversity determines the resilience of ecosystems to environmental change. *Biological Reviews*, 2013, 88(2): 349-364.
- [27] Schulze E D, Mooney H. *Biodiversity and Ecosystem Function*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994.
- [28] 张雪妮, 吕光辉, 王庭权, 马玉, 阿布里孜·阿不都热合曼, 赵晓英, 郭振洁, 朱修逸. 荒漠区垂直河岸带植物多样性格局及其成因. *生态学报*, 2015, 35(18): 5966-5974.
- [29] 张雪妮, 李岩, 何学敏, 吕光辉. 水盐变化对荒漠植物功能多样性与物种多样性关系的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(8): 2354-2360.
- [30] 林嵩. 结构方程模型原理及 AMOS 应用. 武汉: 华中师范大学出版社, 2008.
- [31] Howard A L. Handbook of structural equation modeling. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 2013, 20(2): 354-360.
- [32] Whittaker R H. Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 1972, 21(2/3): 213-251.
- [33] 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分布. *自然资源*, 1993, (01): 15-21.
- [34] Crawford R M M. Eco-hydrology: plants and water in terrestrial and aquatic environments. *Journal of Ecology*, 2000, 88(6): 1095-1096.
- [35] Beatley J C. Phenological events and their environmental triggers in Mojave desert ecosystems. *Ecology*, 1974, 55(4): 856-863.
- [36] 李新荣, 张新时. 鄂尔多斯高原荒漠化草原与草原化荒漠灌木类群生物多样性的研究. *应用生态学报*, 1999, 10(6): 665-669.
- [37] 李新荣, 何明珠, 贾荣亮. 黑河中游荒漠区植物多样性分布对土壤水分变化的响应. *地球科学进展*, 2008, 23(7): 685-691.
- [38] 王继丰, 韩大勇, 王建波, 付晓玲, 朱道光, 刘赢男, 曹宏杰, 黄庆阳, 谢立红, 钟海秀, 隋心, 倪红伟. 三江平原湿地小叶章群落沿土壤水分梯度物种组成及多样性变化. *生态学报*, 2017, 37(10): 3515-3524.
- [39] 许佳宁. 湿地植物多样性及功能性状对土壤水分变化的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [40] 赵新风, 徐海量, 张鹏, 涂文霞, 张青青. 养分与水分添加对荒漠草地植物群落结构和物种多样性的影响. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 167-177.
- [41] 王江. 干旱胁迫对生物多样性与生态系统功能关系的影响[D]. 广州: 中山大学, 2006.
- [42] 吕光辉, 杜昕, 杨建军, 马媛, 孟吉翔. 阜康绿洲——荒漠交错带荒漠植被群落稳定性. *干旱区地理*, 2007, 30(5): 660-665.
- [43] Yang Z L, van Ruijven J, Du G Z. The effects of long-term fertilization on the temporal stability of alpine meadow communities. *Plant and Soil*, 2011, 345(1): 315-324.
- [44] Sasaki T, Lauenroth W K. Dominant species, rather than diversity, regulates temporal stability of plant communities. *Oecologia*, 2011, 166(3): 761-768.
- [45] 王海东, 张璐璐, 朱志红. 刈割、施肥对高寒草甸物种多样性与生态系统功能关系的影响及群落稳定性机制. *植物生态学报*, 2013, 37(4): 279-295.
- [46] 王恒方, 吕光辉, 周耀治, 曹靖. 不同水盐梯度下功能多样性和功能冗余对荒漠植物群落稳定性的影响. *生态学报*, 2017, 37(23): 7928-7937.
- [47] Grime J P. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology*, 1998, 86(6): 902-910.

- [48] Tilman D. The ecological consequences of changes in biodiversity: a search for general principles. *Ecology*, 1999, 80(5): 1455-1474.
- [49] 蒋婧. 外源氮输入对高寒草甸群落物种多样性和生态系统稳定性的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [50] 高贤明, 马克平, 陈灵芝. 暖温带若干落叶阔叶林群落物种多样性及其与群落动态的关系. *植物生态学报*, 2001, 25(3): 283-290.
- [51] Allison G. The influence of species diversity and stress intensity on community resistance and resilience. *Ecological Monographs*, 2004, 74(1): 117-134.
- [52] 刘冠成, 黄雅曦, 王庆贵, 邢亚娟. 环境因子对植物物种多样性的影响研究进展. *中国农学通报*, 2018, 34(13): 83-89.
- [53] 李明峰, 董云社, 齐玉春, 耿元波. 温带草原土地利用变化对土壤碳氮含量的影响. *中国草地*, 2005, 27(1): 1-6.
- [54] Strengbom J, Walheim M, Näsholm T, Ericson L. Regional differences in the occurrence of understorey species reflect nitrogen deposition in Swedish forests. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2003, 32(2): 91-97.
- [55] 杨晓东, Duan L C, 陈悦, 孟凡波, 李岩, 何学敏, 张雪妮, 吕光辉. 荒漠草地中氮添加与多环芳烃降解的关系. *生态学报*, 2019, 39(9): 3153-3166.
- [56] 刘洋, 侯占山, 赵爽, 齐国辉, 张雪梅, 郭素萍. 太行山片麻岩山区造地边坡植被恢复过程中植物多样性与土壤特性的演变. *生态学报*, 2018, 38(15): 5331-5339.
- [57] 兰志春. 氮素增加对典型草原的植物多样性和群落稳定性的影响——植物多样性降低的机制及尺度依赖性[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [58] 高敏凯. 不同水分处理下喀斯特地区两种适生草本植物对 N 添加的生长生理响应[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [59] 白永飞, 李凌浩, 王其兵, 张丽霞, 张焱, 陈佐忠. 锡林河流域草原群落植物多样性和初级生产力沿水热梯度变化的样带研究. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 667-673.
- [60] 李新荣, 张景光, 刘立超, 陈怀顺, 石庆辉. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 257-261.
- [61] 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. *生态学报*, 2008, 28(7): 3116-3124.
- [62] Chytrý M, Tichý L, Roleček J. Local and regional patterns of species richness in Central European vegetation types along the pH/calcium gradient. *Folia Geobotanica*, 2003, 38(4): 429-442.
- [63] Schuster B, Diekmann M. Changes in species density along the soil pH gradient—evidence from German plant communities. *Folia Geobotanica*, 2003, 38(4): 367-379.
- [64] 徐治国, 何岩, 闫百兴, 宋长春. 植物 N/P 与土壤 pH 值对湿地植物物种丰富度的影响. *中国环境科学*, 2006, 26(3): 346-349.
- [65] 任学敏, 杨改河, 王得祥, 秦晓威, 刘振学, 赵双喜, 白宇. 环境因子对巴山冷杉——糙皮桦混交林物种分布及多样性的影响. *生态学报*, 2012, 32(2): 605-613.
- [66] 赵敏, 赵锐锋, 张丽华, 赵海莉, 周远刚. 基于盐分梯度的黑河中游湿地植物多样性及其与土壤因子的关系. *生态学报*, 2019, 39(11): 4116-4126.