

浑善达克沙地不同微地形的土壤物理性质和草本群落分布及其相关性分析

张志永, 时忠杰, 张 晓, 单 楠, 杨晓晖^①

(中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要: 采用样方调查和室内检测相结合法对内蒙古浑善达克沙地迎风坡、坡顶、背风坡和丘间地不同土层(0~10、10~20 和 20~40 cm)的土壤物理性质(包括含水量、田间持水量、容重、总孔隙度和毛管孔隙度)及草本群落的生产力(包括盖度和地上部生物量)和物种多样性(包括 Margalef 丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数)进行比较分析;在此基础上,采用 Pearson 相关性分析法对不同微地形的土壤物理性质与草本群落各指标间以及草本群落生产力与物种多样性各指标间的相关性进行分析。结果表明:4 种微地形的土壤物理性质总体上差异显著,但不同土层的土壤物理性质总体上无明显差异;从丘间地、背风坡、坡顶到迎风坡,土壤的含水量、田间持水量、总孔隙度和毛管孔隙度依次递减,而土壤容重则依次递增,说明迎风坡的土壤结构较差且水分散失较多,而丘间地的土壤结构和水分状况均相对较好。不同微地形间草本群落生产力和物种多样性总体上也存在明显差异,从背风坡、丘间地、坡顶到迎风坡,草本群落的生产力和物种多样性依次递减,仅 Margalef 丰富度指数表现为在丘间地最高、在迎风坡最低,说明迎风坡的草本群落物种多样性较低,群落稳定性差,而背风坡和丘间地的草本群落物种多样性和生产力水平均较高,群落稳定性较好。相关性分析结果表明:该区域的草本群落生产力和物种多样性与土壤容重呈负相关,与土壤的其他物理性状呈正相关,但仅部分指标间有显著或极显著相关性;草本群落生产力与物种多样性各指标间呈正相关,但多数指标间的相关性并不显著。研究结果显示:微地形能够显著影响浑善达克沙地的土壤物理性质和草本群落的分布特征,气候和人为干扰使该沙地的土壤物理性质受到严重破坏,导致草本群落生产力降低并处于不稳定状态。

关键词: 浑善达克沙地; 微地形; 土壤物理性质; 草本群落生产力; 物种多样性; 相关性分析

中图分类号: Q948.114; S151.9⁺2 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2017)01-0069-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2017.01.09

Soil physical properties and herbaceous community distribution in different microtopographies of Otindag Sandy Land and their correlation analysis ZHANG Zhiyong, SHI Zhongjie, ZHANG Xiao, SHAN Nan, YANG Xiaohui^① (Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2017, 26(1): 69-76

Abstract: Soil physical properties (including water content, field capacity, bulk density, total porosity and capillary porosity) in different soil layers (0-10, 10-20 and 20-40 cm), herbaceous community productivity (including coverage and biomass of above-ground part) and species diversity (including Margalef richness index, Simpson diversity index, Shannon-Wiener diversity index and Pielou evenness index) of windward slope, slope top, leeward slope and interdune in Otindag Sandy Land of Inner Mongolia were compared and analyzed by a combination method of field sampling and laboratory testing. On this basis, correlations of soil physical properties with herbaceous community indexes and herbaceous community productivity with species diversity indexes of different microtopographies were analyzed by

收稿日期: 2016-05-31

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0500801); 国家国际科技合作专项资助(2015DFR31130); 国家自然科学基金资助项目(31670515; 41271033; 41471029)

作者简介: 张志永(1986—),男,山东寿光人,博士研究生,主要从事恢复生态学方面的研究。

^①通信作者 E-mail: yangxh@caf.ac.cn

Pearson's correlation analysis method. The results show that in general, there are significant differences in soil physical properties of four microtopographies, while there is no significant difference in that of different soil layers. Soil water content, field capacity, total porosity and capillary porosity decrease successively in the sequence from interdune, leeward slope, slope top to windward slope, while soil bulk density increases successively, indicating that windward slope has a poor soil structure and loses much water, but soil structure and water situation in interdune are relatively good. In addition, there are also significant differences in herbaceous community productivity and species diversity of different microtopographies, which decrease successively in the sequence from leeward slope, interdune, slope top to windward slope, only Margalef richness index is the highest in interdune and the lowest in windward slope, indicating that herbaceous community species diversity is low and community stability is poor in windward slope, but herbaceous community species diversity and productivity level are high and community stability is relatively good in leeward slope and interdune. Correlation analysis results show that herbaceous community productivity and species diversity are negatively correlated with soil bulk density in this region, and are positively correlated with other soil physical properties, but significant or extremely significant correlation is only between some of these indexes. Moreover, there is a positive correlation between productivity and species diversity indexes of herbaceous community, but there is no significant correlation between most of these indexes. It is suggested that microtopographies could significantly affect soil physical properties and herbaceous community distribution pattern of Otindag Sandy Land, climate and artificial interference seriously damage its soil physical properties, which results in reduced productivity and instability of herbaceous community.

Key words: Otindag Sandy Land; microtopography; soil physical property; herbaceous community productivity; species diversity; correlation analysis

土壤作为植物生长的物质基础,是诸多生态过程的载体^[1],因此,了解植物在维持自身生长过程中需要从土壤中获取的资源数量,是理解整个群落物质循环的基础^[2-3]。草本群落由处于不同生态位的草本植物构成,其分布特征是种子扩散和环境筛选共同作用的结果^[4];土壤和草本群落均处于整个生态系统的底层,其空间分布规律不仅受到上层树木的影响,而且在很大程度上受到外界环境的影响,尤其是地形条件的影响;地形对地表资源空间分布的影响主要表现在地表径流、光照条件、降水、风向等方面,且这些影响在干旱和半干旱环境中尤为突出^[5-6]。

浑善达克沙地位于中国北方的农牧交错带,曾是重要的牧草产区,但近30年来,在气候变化和放牧的双重作用下,整个区域的生态结构遭到破坏,出现草本群落稳定性降低、草地生产力下降、沙化面积扩大等一系列生态问题^[7]。赵丽等^[8]认为,由沙丘垄起形成的微地形直接影响沙化草地的资源异质性,在景观上呈现裸露沙土和草本群落相间分布的地貌特征。因此,研究不同微地形的土壤物理性质以及草本群落的空间分布规律,对于了解土壤的结构和功能具有重要参考价值;同时,对了解草本群落与土壤间的关系,以及整个生态系统物质和能量流动及草地承载力等具有重要意义。

鉴于此,作者选择浑善达克沙地中典型沙丘的迎风坡、坡顶、背风坡和丘间地,对0~10、10~20和20~40 cm土层的土壤物理性质以及草本群落的生产力和物种多样性指标进行比较研究,并进行Pearson相关性分析,以期明确微地形对土壤物理性质和草本群落分布的影响,并探寻影响草本群落分布的限制因子,为客观了解浑善达克沙地地表资源的分布特征奠定研究基础,并为了解该区域草本群落的演替过程及制定植被保护和恢复对策提供理论依据。

1 研究区自然概况和研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于内蒙古自治区正蓝旗桑根达来镇周边,地理坐标为东经116°09'~116°10'、北纬42°35'~42°36'。该区域属温带半干旱大陆性季风气候,年均温1.8℃,无霜期107 d;年均降水量313.8 mm,全年降水量分布不均,夏季降水量约占全年降水量的68.3%^[9]。地势由东南向西北倾斜,地貌复杂,沙丘和丘间地相间分布,沙丘相对高度3~15 m^[10]。区内土壤以风沙土为主,含水量低,稳固性差;丘间地常分布有栗钙土和草甸土,间有风沙土等类型土壤,地下水位1.0~1.5 m^[11-13]。区内的木本植物主要有榆树

(*Ulmus pumila* Linn.)、小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla* Lam.) 和 耧斗菜叶 绣线菊 (*Spiraea aquilegifolia* Pall.) 等; 草本植物主要有羊草 [*Leymus chinensis* (Trin. ex Bunge) Tzvel.]、冰草 [*Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn.]、狗尾草 [*Setaria viridis* (Linn.) P. Beauv.]、灰绿藜 (*Chenopodium glaucum* Linn.)、委陵菜 (*Potentilla chinensis* Ser.)、冷蒿 (*Artemisia frigida* Willd.)、赖草 [*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.]、糙隐子草 [*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng] 和 叉分蓼 (*Polygonum divaricatum* Linn.) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 样点布设和采样方法 在前期实地调查基础上, 于 2015 年 8 月选取典型沙丘, 在垂直沙丘走向的方向上设置面积 20 m×240 m 的样带, 并按照迎风坡、坡顶、背风坡和丘间地 4 种微地形将样带分成 12 个面积 20 m×20 m 的样方, 每种微地形各 3 个样方; 按照“S”形在每个样方内设置 9 个面积 1 m×1 m 的小样方, 共计 108 个小样方。记录每个小样方内所有植物的种名、盖度及株(丛)数等信息, 并收集每个小样方内所有草本植物的地上部, 用于测定草本群落地上部生物量。同时, 在每个小样方内挖取深度 50 cm 的土壤剖面, 分别利用铝盒和环刀按照 0~10、10~20 和 20~40 cm 3 个土层进行土壤取样, 每层 3 个土样, 共计 972 个土样; 将所有土样迅速带回实验室, 用于检测土壤含水量、田间持水量、容重、总孔隙度和毛管

孔隙度。整个采样及间隔期间无明显降水。

1.2.2 土壤物理性质测定 土壤含水量采用烘干法^[14]测定; 田间持水量、容重、总孔隙度和毛管孔隙度均采用环刀法^[15]测定。每个指标重复测定 3 次。

1.2.3 草本群落相关指标测定和分析 采用烘干法^[6,16]测定各小样方内所有草本植物地上部的总生物量, 即为草本群落的地上部生物量。采用针刺法^[17]测定各小样方内草本群落的盖度。参照孔凡洲等^[18]的方法计算草本群落的物种多样性指数, 包括 Margalef 丰富度指数 (d_{Ma})、Simpson 多样性指数 (D)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H_e')、Pielou 均匀度指数 (J_e)。

1.3 数据处理及统计分析

采用 EXCEL 2010 和 Origin 8 软件处理数据并绘制图表; 采用 SPSS 18.0 统计分析软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 Pearson 相关性分析。

2 结果和分析

2.1 不同微地形间土壤物理性质的比较分析

2.1.1 不同土层土壤含水量和田间持水量的比较分析 内蒙古浑善达克沙地不同微地形中各土层土壤含水量和田间持水量的比较结果见表 1。

由表 1 可见: 4 种微地形间的土壤含水量有显著差异 ($P < 0.05$), 其中, 土壤含水量平均值在丘间地最高 (3.56%)、在迎风坡最低 (1.93%)、在背风坡和坡

表 1 内蒙古浑善达克沙地不同微地形中不同土层土壤含水量和田间持水量的比较 ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 1 Comparison on soil water content and field capacity in different soil layers of different microtopographies in Otindag Sandy Land of Inner Mongolia ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

微地形 Microtopography	不同土层的土壤含水量/% Soil water content in different soil layers			
	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	平均值 Average
迎风坡 Windward slope	2.30±0.14Ca	1.75±0.09Cb	1.73±0.07Bb	1.93±0.05D
坡顶 Slope top	2.36±0.12Ca	2.40±0.14Ba	2.74±0.18Aa	2.50±0.14C
背风坡 Leeward slope	3.58±0.15Ba	2.70±0.12Bb	2.12±0.12Bc	2.80±0.10B
丘间地 Interdune	6.55±0.12Aa	3.54±0.16Ab	2.58±0.22Ac	3.56±0.12A
微地形 Microtopography	不同土层的田间持水量/% Field capacity in different soil layers			
	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	平均值 Average
迎风坡 Windward slope	16.70±0.39Da	15.61±0.49Ca	15.70±0.57Ca	16.00±0.42D
坡顶 Slope top	18.25±0.38Ca	17.17±0.49Ba	17.43±0.60Ba	17.61±0.44C
背风坡 Leeward slope	20.15±0.51Ba	19.68±0.43Aa	20.12±0.57Aa	19.98±0.40B
丘间地 Interdune	21.85±0.74Aa	20.38±0.46Aa	21.59±0.66Aa	21.28±0.55A

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示不同微地形间同一指标差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference of the same index among different microtopographies ($P < 0.05$); 同行中不同的小写字母表示不同土层间同一指标差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant difference of the same index among different soil layers ($P < 0.05$).

顶居中(分别为2.80%和2.50%)。迎风坡、背风坡和丘间地各土层间的土壤含水量总体上差异显著,均表现为0~10 cm 土层最高、20~40 cm 土层最低;而坡顶各土层间土壤含水量无显著差异,表现为20~40 cm 土层最高、0~10 cm 土层最低。

由表1还可见:4种微地形间的土壤田间持水量差异显著,其中,土壤田间持水量平均值在丘间地最高(21.28%)、在迎风坡最低(16.00%)、在背风坡和坡顶居中(分别为19.98%和17.61%)。4种微地形不同土层间的土壤田间持水量均无显著差异,且均表现为0~10 cm 土层最高、10~20 cm 土层最低。

总体上看,浑善达克沙地不同微地形间的土壤水分状况有明显差异,表现为从丘间地、背风坡、坡顶到迎风坡依次递减的趋势,而不同土层间的土壤水分状况总体上无明显差异。比较而言,丘间地的土壤水分状况最好,迎风坡的水分状况最差。

2.1.2 不同土层土壤容重和孔隙度的比较分析 内蒙古浑善达克沙地不同微地形中各土层土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度的比较结果见表2。

由表2可见:仅坡顶和背风坡间的土壤容重无显著差异,其他微地形间的土壤容重均有显著差异,其

中,土壤容重平均值在迎风坡最高($1.63 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、在丘间地最低($1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、在坡顶和背风坡居中(分别为 1.58 和 $1.56 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。各土层间的土壤容重总体上无显著差异,其中,迎风坡、坡顶和丘间地的土壤容重均表现为10~20 cm 土层最高、0~10 cm 土层最低;而背风坡的土壤容重则表现为10~20 cm 土层最高、20~40 cm 土层最低。

由表2还可见:仅背风坡和丘间地的土壤总孔隙度和毛管孔隙度无显著差异,4种微地形间的土壤总孔隙度和毛管孔隙度总体上有显著差异,其中,土壤总孔隙度和毛管孔隙度的平均值均表现为在丘间地最高(分别为37.92%和35.26%)、在迎风坡最低(分别为33.53%和30.37%)、在背风坡和坡顶居中(分别为37.72%和34.97%,36.05%和33.21%)。各土层间土壤总孔隙度和毛管孔隙度均无显著差异;其中,土壤总孔隙度均表现为0~10 cm 土层最高、10~20 cm 土层最低;土壤毛管孔隙度在迎风坡和坡顶均表现为0~10 cm 土层最高,在背风坡和丘间地均表现为0~40 cm 土层最高,在坡顶、背风坡和丘间地均表现为10~20 cm 土层最低,而在迎风坡表现为20~40 cm 土层最低。

表2 内蒙古浑善达克沙地不同微地形中不同土层土壤容重和孔隙度的比较($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 2 Comparison on soil bulk density and porosity in different soil layers of different microtopographies in Otindag Sandy Land of Inner Mongolia ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

微地形 Microtopography	不同土层的容重/% Bulk density in different soil layers			平均值 Average
	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	
迎风坡 Windward slope	1.62±0.01Aa	1.65±0.01Aa	1.63±0.01Aa	1.63±0.01A
坡顶 Slope top	1.57±0.01Ba	1.60±0.01Ba	1.59±0.01Ba	1.58±0.01B
背风坡 Leeward slope	1.56±0.01Ba	1.57±0.01Ba	1.55±0.01Ca	1.56±0.01B
丘间地 Interdune	1.47±0.02Cb	1.54±0.01Ca	1.50±0.02Dab	1.50±0.02C
微地形 Microtopography	不同土层的总孔隙度/% Total porosity in different soil layers			平均值 Average
	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	
迎风坡 Windward slope	34.61±0.47Ca	32.86±0.63Ca	33.13±0.69Ca	33.53±0.53C
坡顶 Slope top	36.79±0.45BCa	35.60±0.61Ba	35.74±0.75Ba	36.05±0.54B
背风坡 Leeward slope	37.98±0.47ABa	37.46±0.64Aa	37.71±0.70Aa	37.72±0.45A
丘间地 Interdune	38.36±0.62Aa	37.29±0.48Aa	38.09±0.64Aa	37.92±0.51A
微地形 Microtopography	不同土层的毛管孔隙度/% Capillary porosity in different soil layers			平均值 Average
	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	
迎风坡 Windward slope	31.33±0.48Ba	29.91±0.64Ca	29.89±0.77Ba	30.37±0.56C
坡顶 Slope top	33.97±0.46Aa	32.82±0.59Ba	32.84±0.78Ba	33.21±0.54B
背风坡 Leeward slope	35.12±0.47Aa	34.65±0.54Aa	35.13±0.68Aa	34.97±0.41A
丘间地 Interdune	35.42±0.56Aa	34.90±0.54Aa	35.46±0.58Aa	35.26±0.50A

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示不同微地形间同一指标差异显著($P < 0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference of the same index among different microtopographies ($P < 0.05$); 同行中不同的小写字母表示不同土层间同一指标差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant difference of the same index among different soil layers ($P < 0.05$).

总体上看,浑善达克沙地不同微地形间的土壤容重和孔隙度总体上差异显著,其中,从丘间地、背风坡、坡顶到迎风坡,土壤容重依次递增,而孔隙度则依次递减;但不同土层间的土壤容重和孔隙度基本上无显著差异。比较而言,丘间地土壤的物理性质相对较好,表现为土壤容重更小、孔隙状况更佳、成土作用更强、土壤结构相对较好。

2.2 不同微地形间草本群落生产力和物种多样性的比较分析

2.2.1 草本群落生产力的比较分析

内蒙古浑善达克沙地不同微地形中草本群落生产力(包括群落盖度和地上部生物量)的比较结果见表 3。结果表明:草本群落盖度在丘间地与坡顶和背风坡间无显著差异,但在其他微地形间均有显著差异($P < 0.05$);其中,草本群落盖度在背风坡最高(83.33%)、在迎风坡最低(42.93%)、在丘间地和坡顶居中(分别为 81.11%和 71.85%)。草本群落地上部生物量在坡顶、背风坡和丘间地间无显著差异,但它们与迎风坡均有显著差异;其中,草本群落地上部生物量在背风坡最高($82.68 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)、在迎风坡最低($56.59 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)、

在丘间地和坡顶居中(分别为 80.77 和 $79.83 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)。

总体上看,浑善达克沙地不同微地形间草本群落盖度和地上部生物量有一定差异,表现出从背风坡、丘间地、坡顶到迎风坡依次递减的趋势。比较而言,草本植物生产力水平在背风坡最高、在迎风坡最低。

2.2.2 草本群落物种多样性的比较分析

内蒙古浑善达克沙地不同微地形中草本群落物种多样性(包括 Margalef 丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数)的比较结果见表 4。

Margalef 丰富度指数在 4 种微地形间大多差异显著,仅在背风坡与坡顶和丘间地间无显著差异;其中, Margalef 丰富度指数在丘间地最高(1.59)、在迎风坡最低(1.03)、在背风坡和坡顶居中(分别为 1.43 和 1.31)。

Simpson 多样性指数在 4 种微地形间大多差异显著,仅在丘间地与坡顶和背风坡间无显著差异;但 Shannon-Wiener 多样性指数则在迎风坡与坡顶、背风坡和丘间地间差异显著,而在后 3 种微地形间却无显著差异。其中, Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均在背风坡最高(分别为 0.68 和 1.51)、在迎风坡最低(分别为 0.41 和 0.85)、在丘间地和坡顶居中(在丘间地分别为 0.66 和 1.47,在坡顶分别为 0.57 和 1.29)。

Pielou 均匀度指数在迎风坡与坡顶、背风坡和丘间地间均有显著差异,而在后 3 种微地形间则无显著差异;其中, Pielou 均匀度指数在背风坡最高(0.71)、在迎风坡最低(0.46)、在丘间地和坡顶居中(分别为 0.64 和 0.63)。

总体上看,浑善达克沙地不同微地形间草本群落物种多样性具有一定的差异,从背风坡、丘间地、坡顶到迎风坡依次递减。比较而言,草本群落的物种多样

表 3 内蒙古浑善达克沙地不同微地形中草本群落的盖度和地上部生物量比较($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 3 Comparison on coverage and biomass of above-ground part of herbaceous community of different microtopographies in Otindag Sandy Land of Inner Mongolia ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

微地形 Microtopography	盖度/% Coverage	地上部生物量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ Biomass of above-ground part
迎风坡 Windward slope	42.93±4.83C	56.59±4.96B
坡顶 Slope top	71.85±4.35B	79.83±3.52A
背风坡 Leeward slope	83.33±2.03A	82.68±2.55A
丘间地 Interdune	81.11±2.83AB	80.77±3.39A

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示不同微地形间同一指标差异显著($P < 0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference of the same index among different microtopographies ($P < 0.05$).

表 4 内蒙古浑善达克沙地不同微地形中草本群落的物种多样性指标比较($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

Table 4 Comparison on species diversity index of herbaceous community of different microtopographies in Otindag Sandy Land of Inner Mongolia ($\bar{X} \pm SE$)¹⁾

微地形 Microtopography	Margalef 丰富度指数 Margalef richness index	Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index
迎风坡 Windward slope	1.03±0.07C	0.41±0.04C	0.85±0.08B	0.46±0.04B
坡顶 Slope top	1.31±0.11B	0.57±0.05B	1.29±0.13A	0.63±0.05A
背风坡 Leeward slope	1.43±0.07AB	0.68±0.03A	1.51±0.07A	0.71±0.03A
丘间地 Interdune	1.59±0.09A	0.66±0.02AB	1.47±0.06A	0.64±0.02A

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示不同微地形间同一指标差异显著($P < 0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference of the same index among different microtopographies ($P < 0.05$).

性在背风坡最高、在迎风坡最低。

2.3 不同微地形间土壤物理性质与草本群落的生产力和物种多样性的相关性分析

内蒙古浑善达克沙地不同微地形中土壤物理性质与草本群落的生产力和物种多样性的 Pearson 相

关性分析结果见表 5。结果表明,4 种微地形中草本群落的盖度、地上部生物量、Margalef 丰富度指数、Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数与土壤容重均呈负相关,但与土壤的其他物理指标则呈正相关。

表 5 内蒙古浑善达克沙地不同微地形中土壤物理性质与草本群落的生产力和物种多样性的 Pearson 相关性分析结果比较
Table 5 Comparison on result of Pearson's correlation analysis of soil physical property with productivity of herbaceous community and species diversity of different microtopographies in Otindag Sandy Land of Inner Mongolia

指标 ¹⁾ Index ¹⁾	迎风坡各指标的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient of different indexes in windward slope ²⁾					坡顶各指标的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient of different indexes in slope top ²⁾				
	含水量 Water content	田间持水量 Field capacity	容重 Bulk density	总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	含水量 Water content	田间持水量 Field capacity	容重 Bulk density	总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity
C	0.117	0.058	-0.058	0.289	0.030	0.621**	0.240	-0.058	0.122	0.083
BAP	0.032	0.025	-0.006	0.216	0.069	0.142	0.007	-0.175	0.059	0.030
d_{Ma}	0.426*	0.498**	-0.577**	0.505**	0.453*	0.175	0.574**	-0.147	0.545**	0.570**
D	0.162	0.070	-0.262	0.370	0.093	0.024	0.524**	-0.217	0.517**	0.526**
H_e'	0.241	0.186	-0.361	0.474*	0.201	0.096	0.576**	-0.228	0.553**	0.563**
J_e	0.054	0.009	-0.183	0.300	0.039	0.007	0.472*	-0.192	0.472*	0.479*

指标 ¹⁾ Index ¹⁾	背风坡各指标的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient of different indexes in leeward slope ²⁾					丘间地各指标的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient of different indexes in interdune ²⁾				
	含水量 Water content	田间持水量 Field capacity	容重 Bulk density	总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	含水量 Water content	田间持水量 Field capacity	容重 Bulk density	总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity
C	0.190	0.325	-0.312	0.193	0.272	0.762**	0.453*	-0.513**	0.338	0.283
BAP	0.498**	0.250	-0.319	0.251	0.301	0.163	0.346	-0.316	0.323	0.291
d_{Ma}	0.261	0.489**	-0.524**	0.443*	0.496*	0.387*	0.353	-0.323	0.368	0.446*
D	0.203	0.027	-0.017	0.204	0.131	0.222	0.311	-0.283	0.333	0.481*
H_e'	0.255	0.166	-0.164	0.301	0.259	0.255	0.303	-0.273	0.319	0.467*
J_e	0.158	0.050	-0.059	0.139	0.062	0.155	0.209	-0.179	0.190	0.345

¹⁾ C: 盖度 Coverage; BAP: 地上部生物量 Biomass of above-ground part; d_{Ma} : Margalef 丰富度指数 Margalef richness index; D : Simpson 多样性指数 Simpson diversity index; H_e' : Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; J_e : Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index.

²⁾ *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

在迎风坡,草本群落的 Margalef 丰富度指数与土壤的含水量和毛管孔隙度呈显著正相关($P < 0.05$),与土壤的田间持水量和总孔隙度呈极显著正相关($P < 0.01$),与土壤容重呈极显著负相关;Shannon-Wiener 多样性指数与土壤的总孔隙度则呈显著正相关。在坡顶,草本群落的盖度与土壤的含水量呈极显著正相关,Margalef 丰富度指数、Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数分别与土壤的田间持水量、总孔隙度和毛管孔隙度呈极显著正相关,Pielou 均匀度指数与土壤的田间持水量、总孔隙度和毛管孔隙度呈显著正相关。在背风坡,草本群落的地上部生物量与土壤含水量呈极显著正相关;Margalef 丰富度指数与土壤的田间持水量和容重分别呈极显著正相关和负相关,与土壤的总孔隙度和毛管孔隙度呈显著

正相关。在丘间地,草本群落的盖度与土壤的含水量和容重分别呈极显著正相关和负相关,与土壤的田间持水量呈显著正相关;Margalef 丰富度指数与土壤的含水量和毛管孔隙度呈显著正相关;Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数则与土壤的毛管孔隙度呈显著正相关。

总体上看,浑善达克沙地微地形可在一定程度上影响其土壤物理性质与草本群落生产力和物种多样性的关系。

2.4 不同微地形间草本群落生产力和物种多样性的相关性分析

内蒙古浑善达克沙地不同微地形中草本群落生产力(即盖度和地上部生物量)与物种多样性间的 Pearson 相关性分析结果见表 6。

表 6 内蒙古浑善达克沙地不同微地形中草本群落生产力与物种多样性的 Pearson 相关性分析结果比较

Table 6 Comparison on result of Pearson's correlation analysis of productivity of herbaceous community with species diversity of different microtopographies in Otindag Sandy Land of Inner Mongolia

指标 ¹⁾ Index ¹⁾	与不同微地形草本群落盖度的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient with coverage of herbaceous community in different microtopographies ²⁾				与不同微地形草本群落地上部生物量的相关系数 ²⁾ Correlation coefficient with biomass of above-ground part of herbaceous community in different microtopographies ²⁾			
	迎风坡	坡顶	背风坡	丘间地	迎风坡	坡顶	背风坡	丘间地
	Windward slope	Slope top	Leeward slope	Interdune	Windward slope	Slope top	Leeward slope	Interdune
d_{Ma}	0.093	0.496**	0.184	0.050	0.074	0.113	0.394*	0.172
D	0.369	0.455*	0.091	0.037	0.322	0.124	0.114	0.052
H_e'	0.363	0.514**	0.031	0.032	0.319	0.136	0.212	0.055
J_e	0.347	0.425*	0.058	0.047	0.346	0.145	0.076	0.203

¹⁾ d_{Ma} : Margalef 丰富度指数 Margalef richness index; D : Simpson 多样性指数 Simpson diversity index; H_e' : Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; J_e : Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index.

²⁾ *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

由表 6 可见,4 种微地形中草本群落的盖度和地上部生物量与物种多样性均呈正相关。在坡顶,草本群落盖度与 Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均呈极显著正相关($P < 0.01$),与 Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均呈显著正相关($P < 0.05$);在迎风坡、背风坡和丘间地,草本群落的盖度和地上部生物量总体上与物种多样性的相关性均不显著,仅背风坡的草本群落地上部生物量与 Margalef 丰富度指数呈显著正相关。

总体上看,浑善达克沙地的微地形可在一定程度上影响其草本群落生产力与物种多样性间的关系。

3 讨论和结论

土壤是不断发展变化的生态系统,包括物理、化学、生物等多个组分,这些组分相互影响和作用,进行多种复杂的系统发育过程^[19]。土壤物理性质是土壤其他性质的结构性基础,直接影响土壤的其他性质,对于土壤系统发育具有重要作用^[20]。从上述研究结果看,在浑善达克沙地中,由沙丘造成的微地形显著影响其土壤的物理性质,其中,丘间地的土壤水分状况和结构最佳,而迎风坡的土壤水分状况和结构最差。这可能是因为在风力侵蚀作用下,迎风坡的土壤结构较差,水分散失量也较大,不利于土壤贮存水分;而在丘间地,沙丘的阻隔降低了风力等环境因子对土壤的侵蚀作用,相对平坦的地形也利于成土,因此,丘间地的土壤结构和水分状况相对良好。

草本群落的盖度和地上部生物量是反映草本群落生产力的重要指标,并可体现植物从环境中获取资源的能力^[21-22]。物种多样性是生态系统功能和结构

的基础,是体现群落结构特征的有效指标,可以直接或间接反映群落的演替阶段、稳定程度等信息^[23];根据“多样性-稳定性”理论,物种多样性增大可提高生态系统的稳定性,使群落结构更加完整,而物种多样性减小则直接威胁生态系统的可持续发展^[24-26]。在浑善达克沙地不同微地形中,草本群落的分布特征具有明显差异,其中,草本群落的生产力和物种多样性总体上在背风坡最高、在丘间地也相对较高、在迎风坡最低。这可能是因为迎风坡的环境条件相对恶劣,导致部分生态位较窄的草本植物死亡或被迫休眠,从而使迎风坡的草本群落物种多样性下降,群落稳定性也随之下降;而背风坡和丘间地的环境条件相对优越,利于植物繁殖和生长,丰富了群落的物种多样性,进而使草本群落的生产力水平和稳定性提高。人工放牧既是该区域的重要生产方式,也是草本群落退化的主要干扰因子。地形相对平缓的丘间地便于人们开展放牧活动,对草本群落的世代更新有较大干扰,而地形相对崎岖的背风坡反而更利于植物的繁殖和生长,这也可能是背风坡的草本群落盖度、地上部生物量和物种多样性优于丘间地的重要原因之一。

土壤可通过水、热、气、肥等多方面调节并影响植物的生长^[27],而植物(尤其是根系)的各项生命活动又可改善土壤结构,促进成土过程,影响土壤的物理性质^[28]。相关性分析结果表明:浑善达克沙地的土壤物理性质与草本群落的生产力和物种多样性大多呈正相关,但仅部分指标间的相关性达到显著水平($P < 0.05$),说明浑善达克沙地的土壤结构已受到严重破坏,对草本植物生长的支持能力较弱。

草本群落的生产力和物种多样性是草地生态系统健康发展的重要指标,对于草地生态系统的稳定性

和持续性具有重要意义^[16]。浑善达克沙地草本群落的生产力与物种多样性间的相关性大多呈不显著正相关,符合“多样性-生产力”假说,即草地生产力随物种多样性提高而增加^[24]。根据该假说,在物种丰富、多样性较高的草本群落中,不同物种占据各自的生态位,避免了种间竞争,从而使群落生产力有较大提高。近年来,在干旱气候趋重的背景下,浑善达克沙地中草本群落的更新过程受到严重干扰,物种稀疏,群落处于不稳定状态且退化严重,表现出该区域草本群落的生产力与物种多样性总体上无显著相关性,说明在受到环境干扰的条件下,将“多样性-生产力”假说应用于沙化草地具有一定的局限性。

参考文献:

- [1] 康冰,刘世荣,蔡道雄,等. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2479-2486.
- [2] ROSSATTO D R, SILVA L C R, STERNBERG L S L, et al. Do woody and herbaceous species compete for soil water across topographic gradients? Evidence for niche partitioning in a Neotropical savanna[J]. South African Journal of Botany, 2014, 91: 14-18.
- [3] FERREIRA J N, BUSTAMANTE M, GARCIA-MONTIEL D C, et al. Spatial variation in vegetation structure coupled to plant available water determined by two-dimensional soil resistivity profiling in a Brazilian savanna[J]. Oecologia, 2007, 153: 417-430.
- [4] SMITH S E, RILEY E, TISS J L, et al. Geographical variation in predictive seedling emergence in a perennial desert grass[J]. The Journal of Ecology, 2000, 88: 139-149.
- [5] 孙中峰,张学培,刘卉芳,等. 晋西黄土区坡面尺度土壤水分分布规律研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(6): 846-849.
- [6] 方楷,宋乃平,魏乐,等. 荒漠草原不同地形条件下土壤水分和地上生物量的时空分异[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 641-647.
- [7] 朱选伟,黄振英,张淑敏,等. 浑善达克沙地冰草种子萌发、出苗和幼苗生长对土壤水分的反应[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 364-370.
- [8] 赵丽,王晓江,刘果厚,等. 浑善达克沙地榆树种群结构、格局及动态研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 508-513.
- [9] 刘振,李红丽,董智,等. 浑善达克沙地2种生境下榆树种群空间格局[J]. 林业科学, 2012, 48(1): 29-34.
- [10] 陈有君,关世英,李绍良,等. 内蒙古浑善达克沙地土壤水分状况的分析[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(1): 80-85.
- [11] 刘美珍,蒋高明,李永庚,等. 浑善达克退化沙地草地生态恢复试验研究[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2719-2727.
- [12] 谷伟,岳永杰,李钢铁,等. 浑善达克沙地榆种子雨的扩散规律[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3440-3448.
- [13] 彭羽,蒋高明,牛书丽,等. 浑善达克沙地中部典型固定沙丘植物群落分析[J]. 西北植物学报, 2006, 26(7): 1414-1419.
- [14] 王文,蒋文兰,谢忠奎,等. 黄土丘陵地区唐古特白刺根际土壤水分与根系分布研究[J]. 草业学报, 2013, 22(1): 20-28.
- [15] 曹国栋,陈接华,夏军,等. 玛纳斯河流域扇缘带不同植被类型下土壤物理性质[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 195-204.
- [16] 干珠扎布,段敏杰,郭亚奇,等. 喷灌对藏北高寒草地生产力和物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7485-7493.
- [17] 陈芙蓉,程积民,刘伟,等. 不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2856-2866.
- [18] 孔凡洲,于仁成,徐子钧,等. 应用 Excel 软件计算生物多样性指数[J]. 海洋科学, 2012, 36(4): 57-62.
- [19] KARLEN D L, MAUSBACH M J, DORAN J W, et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial) [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61: 4-10.
- [20] 张仁陟,罗珠珠,蔡立群,等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤物理质量的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(4): 1-10.
- [21] SCURLOCK J M O, JOHNSON K, OLSON R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements[J]. Global Change Biology, 2002, 8: 736-753.
- [22] NI J. Estimating net primary productivity of grasslands from field biomass measurements in temperate northern China [J]. Plant Ecology, 2004, 174: 217-234.
- [23] 李旭华,邓永利,张峰,等. 山西庞泉沟自然保护区森林群落物种多样性[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1667-1673.
- [24] TILMAN D, WEDIN D, KNOPS J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems [J]. Nature, 1996, 379: 718-720.
- [25] MCCANN K S. The diversity-stability debate [J]. Nature, 2000, 405: 228-233.
- [26] ARAGÓN R, OESTERHELD M, IRISARRI G, et al. Stability of ecosystem functioning and diversity of grasslands at the landscape scale [J]. Landscape Ecology, 2011, 26: 1011-1022.
- [27] JOHN R, DALLING J W, HARMS K E, et al. Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104: 864-869.
- [28] SAUER T J, CAMBARDELLA C A, MEEK D W. Spatial variation of soil properties relating to vegetation changes [J]. Plant and Soil, 2006, 280: 1-5.

(责任编辑:佟金凤)