

古尔班通古特沙漠 2 种典型固沙措施的生态恢复效应

姜有为^{1,2},张 恒³,张志伟^{4*},陶洪飞^{1,2},陕 茜^{1,2},李 巧^{1,2}

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052;2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830052;
3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所,新疆 乌鲁木齐 830011;4. 西藏农牧学院,西藏 林芝 860000)

摘要:草方格和草方格-人工林综合防护措施是荒漠区风沙危害防治和生态恢复的重要措施,以古尔班通古特沙漠建植的草方格和草方格-人工林综合防护措施区为研究对象,相邻自然沙垄为对照,通过调查和计算植物多样性指数、丰富度和多度,测定土壤养分指标,对比分析了 2 种措施的生态恢复效应。结果表明:1)草方格和草方格-人工林综合防护措施实施后,植物多度由裸沙地分别恢复至 22 株和 87 株,物种丰富度分别达到了 19 和 26,科数分别达到了 9 科和 12 科;草方格样地内土壤养分各指标值除有效 P、全 N、有机质低于自然沙垄外,全 P、全 K、有效 N、速效 K 均基本恢复至自然沙垄水平,草方格-人工林样地内除全 K 含量与自然沙垄基本一致,其余指标均极显著高于($P < 0.01$)自然沙垄。2)植物多度、丰富度、多样性指数均表现为草方格-人工林样地 $>$ 草方格样地,且前者群落生活型结构比后者更复杂,演替速度也更快。3)人工林建植产生的灌丛“肥岛”效应,使得草方格-人工林样地内土壤养分含量显著提升,土壤养分各指标的富集率除全 K 与草方格样地基本一致外,有效 P、全 N、有机质、全 P、有效 N、速效 K 均高于草方格样地。综上所述,在古尔班通古特沙漠工程扰动区,采取草方格-人工林综合防护措施比仅采用草方格措施更有利于生态恢复。

关键词:草方格;草方格-人工林综合防护措施;生态恢复;土壤养分

中图分类号:S775

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2021)06-0047-08

Ecological Restoration Effects of Two Typical Sand Fixation Measures in the Gurbantunggut Desert

JIANG You-wei^{1,2},ZHANG Heng³,ZHANG Zhi-wei^{4*},TAO Hong-fei^{1,2},SHAN Rui^{1,2},LI Qiao^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, Xinjiang, China;

3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

4. Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi 860000, Tibet, China)

Abstract: The straw checkerboard barrier and vegetation protective system play important roles in desertification control and ecological restoration in desert area. In order to figure out the ecological restoration effects of straw checkerboard barrier and vegetation protective system, we investigated the diversity index, species richness, abundance and measured the indicator of soil nutrients. Our results showed that 1) the implementation of straw checkerboard barrier and vegetation protective system had significant effects on ecological indicators and soil nutrient indicators in the research area. The plant abundances of the two measures per square meter restored from bare sand to 22 and 87, respectively, and the species richness reached 19 and 26, respectively. The number of plant families reached 9 and 12, respectively. The available phos-

收稿日期:2020-11-19 修回日期:2021-04-17

基金项目:西藏自治区自然科学基金项目(XZ 2019 ZR G-61);第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0405)。

作者简介:姜有为,硕士,讲师。研究方向:干旱区生态恢复。E-mail:bmwanml214@sina.cn

*通信作者:张志伟,硕士,讲师。研究方向:水土保持及荒漠区划。E-mail:aiwoweige@163.com

phorus, total nitrogen, and organic matter of soil nutrient indicators in straw checkerboard barrier plot were lower than those of natural dune, while the total phosphorus, total potassium, available nitrogen, and available potassium basically restored to the levels of natural dune. In the vegetation protective system plot, except that the total potassium was basically the same as the natural dune, the other indicators of nutrients were significantly higher ($P < 0.01$) than those of the natural dune. 2) The plant abundance, richness and diversity index in the vegetation protective system plot were higher than the straw checkerboard barrier plots, and the community lifeform structure was more complex and the succession speed was also faster than the plants in straw checkerboard barrier plots. 3) Due to the “fertile island” effect of the shrubs produced by the plantation, the soil nutrient content in the vegetation protective system plots significantly increased. Except for the total potassium, the enrichment rates of available phosphorus, total nitrogen, organic matter, total phosphorus, available nitrogen, and available potassium in the vegetation protective system plots were higher than those of the straw checkerboard barrier plots. To sum up, in the disturbance zone of project in Gurbantunggut Desert, adopting vegetation protective system measures was more conducive to ecological restoration than merely adopting straw checkerboard barrier measures.

Key words: straw checkerboard barrier; vegetation protective system; ecological restoration; soil nutrient

干旱荒漠区脆弱的生态系统决定了其一旦遭受破坏,自然恢复十分困难^[1],随着我国对荒漠中油气资源的勘探和开发,水利、铁路和公路工程的实施和运行,对地表造成了大面积和高强度的扰动^[2-3],植被及土壤结构遭到严重破坏。草方格和草方格-人工林相结合的综合防护措施作为荒漠区防治沙害和生态恢复的重要手段,在荒漠化防治工作中被广泛应用,并在不同荒漠区的治理中起到了关键作用^[4-6]。

有研究表明,草方格和草方格-人工林综合防护体系可以通过改变地表覆盖,阻碍强风与地表的直接接触和增加地表粗糙度的方式来稳定沙表面^[6],从而达到防风固沙的效果。此外,这2种措施在改善土壤理化性质,促进沙漠脆弱生态的恢复中也具有重要意义,因此也受到了学者们的广泛关注^[5,7],大量的研究从不同铺设年限的角度,分别探讨了2种措施对生态恢复的影响,发现2种措施的铺设都能够拦截风沙流中的沙物质,使固沙区黏粒、粉粒和极细砂含量增加^[8-9],逐步稳定沙表面,改善土壤的理化性质,从而为植物入侵创造条件^[10],并且呈现出随固沙年限的延长,固沙区植物多样性、丰富度、多度、盖度和土壤肥力明显提升的趋势^[9]。而针对两种固沙措施效应的比较主要集中在措施的投资成本和防风固沙方面^[11],对措施铺设后的生态恢复效应的对比还少有涉及。

2种固沙措施从表观上来看对沙表面的盖度不同,高度不同,从生理上来看一种是植物残体,另一种是植物残体和活体相结合的形式,这可能会影响沙物质的沉积、枯落物的累积和植物的定居,造成2种固沙措施之间的生态恢复效应存在区别,而这种区别在指导荒漠区固沙措施的选择策略上有重要作用。

用。本研究调查和对比了古尔班通古特沙漠中2种典型固沙措施铺设后,固沙区内植物的多度、丰富度和多样性等生态指标,并分析了各措施样地内土壤养分各指标,旨在评价2种措施之间生态恢复效应的差异,为在研究区对两种固沙措施效应的评估和下一步措施的管理提供科学依据。

1 研究区概况

古尔班通古特沙漠($44^{\circ}15' - 46^{\circ}50' N$, $84^{\circ}50' - 91^{\circ}20' E$)地处准噶尔盆地腹地,是中国第二大沙漠^[2],多年平均降水量 $70 \sim 150$ mm,多年平均均蒸发量在 >2000 mm,冬季有30 cm左右的积雪,沙漠中几乎无地表径流,地下水位较深,沙漠周边约为5 m,内部 >16 m^[12],土壤肥力极为贫瘠。降水主要分布在春夏季,这给短命植物和1年生草本植物的生长发育提供了良好的条件,使得短命植物和1年生草本成为植物群落的主要组成^[13],自然沙垄植被盖度 $15\% \sim 50\%$ 。

2000年在此建设的大型水利工程,形成了宽度约为250 m的扰动带,使得扰动带内的植被遭到严重破坏成为裸沙地,土壤养分含量接近于流沙^[2]。主体工程基本成型后,在裸沙地表面铺设了1 m×1 m的草方格沙障,草方格材料为芦苇秆,并在草方格内种植了白梭梭(*Haloxylon persicum*)和沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)混交林及白梭梭纯林,株行距以2 m×1 m为主,研究区位于沙漠南缘,新疆阜康市以北约55 km处的固沙措施体系内。

2 研究方法

2.1 样地设置、采样及试验方法

2.1.1 样地设置 本研究分别选取2003年铺设的

草方格措施段和草方格-人工林措施段作为试验样地,选择分别与2种措施段相邻并且未受扰动的自然沙垄作为其各自的对照样地(图1),人工林的株行距为2 m×1 m,树种为白梭梭纯林,试验样地和对照样地长、宽均设置为150 m×50 m。

2.1.2 植物调查 5月份是古尔班通古特沙漠植物的生长旺季^[14],所以植物调查于2020年5、6月

进行。在所选择的样地内按照从自然沙垄迎风坡坡底到措施样地背风坡坡底的顺序(如图1,按照从1~9号坡位的顺序),5月和6月分别在每个坡位沿着等高线连续选取3个1 m×1 m草方格作为植物调查样方,共取样方108个,记录样方内植物的种类、株高、冠幅和株数。

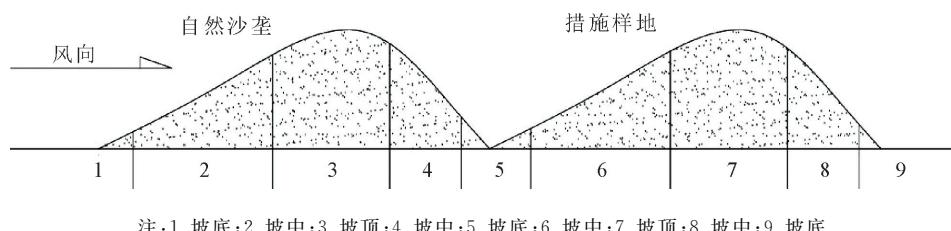


Fig. 1 Cross-sectional sketch map of sample plots

2.1.3 土样采集 古尔班通古特沙漠自然沙垄上的土壤养分在不同坡位间存在较明显的异质性^[14],为确保土样对自然沙垄样地的代表性,分别在1、2、3、4号坡位(图1)进行取样。措施样地内5号坡位既是自然沙垄背风坡坡底又是措施样地迎风坡坡底,土壤不具代表性,且坡顶(7号坡位)未铺设草方格和草方格-人工林措施,为确保土样准确反应措施铺设对土壤养分的影响,措施样地内分别在6、8号坡位(图1)进行取样。在选定的1、2、3、4、6、8号坡位上,每个1 m×1 m植物调查样方中用土钻垂直地面取0~20 cm土样,取样位置均为样方正中心,将同坡位采集的3个样品装入自封袋混匀,带回实验室自然风干,过1 mm筛除去植物残体以测定土壤养分。

2.1.4 试验方法 土壤有机质的测定用重铬酸钾容量法-外加热法,土壤全N的测定用高氯酸-硫酸消化法,土壤有效N的测定用碱解蒸馏法,土壤全P的测定用酸溶-钼锑抗比色法,土壤有效P的测定用0.5 mol/L NaHCO₃浸提钼锑抗比色法,土壤全K的测定用酸溶-火焰光度法,土壤速效K的测定用NH₄OAc浸提-火焰光度法。

2.2 数据处理与分析

根据野外调查数据,分别计算各样地内植物的优势度、Simpson指数、Shannon-Wiener指数、Pielou均匀度指数、Sorenson相似性指数和Cody相异性指数并进行数据分析,计算和分析方法如下。

2.2.1 优势度

优势度=(相对密度+相对高度+相对盖度)/3^[15]其中,相对密度=(某物种个体数/全部种的个体数之和)×100,相对高度=(某物种种植株的平均高度/全部种植株平均高度之和)×100,相对盖度=(某物种

种盖度/全部种的盖度之和)×100。

2.2.2 α多样性

1)群落生态优势度

采用 Simpson 指数(*D*)测定生态优势度

$$D=1-\sum_{i=1}^s[n_i(n_i-1)/N(N-1)] \quad (1)$$

式中,*n_i* 为第*i*个物种的个体数,*s* 为物种数,*N* 为总个体数。

2)Shannon-Wiener 多样性指数(*H*):

$$H=-\sum N_i \ln N_i \quad (2)$$

3)均匀度指数 Pielou

$$J=(H/\ln S) \quad (3)$$

式中,*S* 为群落物种数,*N_i* 为样地中种*i* 的重要值。

2.2.3 物种丰富度和多度

物种丰富度(*S*)=样方中的物种数

物种多度(*A*)=样方中物种个体数

2.2.4 β多样性 本文用以下2种较常用的指标对β多样性进行测度。

1)Sorenson 相似性指数:

$$SI=\frac{2c}{a+b} \quad (4)$$

2)Cody 相异性指数:

$$\beta_c=\frac{g(H)+l(H)}{2}=\frac{a+b-2c}{2} \quad (5)$$

式中,*a* 和 *b* 分别为2群落的物种数,*c* 为2个群落的共有种数,*g(H)* 为沿环境梯度 *H* 增加的物种数,*l(H)* 为沿环境梯度 *H* 失去的物种数。

2.2.5 数据分析与制图 植物多样性和土壤养分等数据的统计和处理均用 Microsoft Excel for Windows 软件,不同样地的多样性指数和土壤养分指标的差异采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行比较,利用富集率(enrichment ratio)来比较草方

格和草方格-人工林措施样地的土壤养分恢复效果,各指标趋势图绘制采用 Origin Pro8 软件。

3 结果与分析

3.1 固沙措施对植物组成的影响

沙漠水利工程扰动区经过自然恢复,植被已经在裸沙地逐渐定居,经调查措施样地内共出现植物 30 种,分属于 12 科 28 属,其中 29 种为草本植物

(表 1)。草方格和草方格-人工林样地内植物多度分别达到了 22 株和 87 株,占对照样地的 18% 和 33%;丰富度分别达到了 19 和 26,占对照样地的 76% 和 90%;科数分别达到了 9 科和 12 科,占对照样地的 69% 和 80%,表明 2 种措施铺设后植被都有较明显的恢复,但是仍未达到自然沙垄水平,此外草方格-人工林样地内的各指标均高于草方格样地,说明其更有利于植被的恢复。

表 1 调查区域不同样地物种组成及优势度

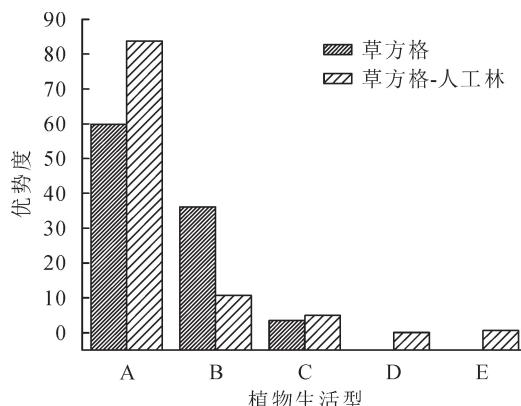
Table 1 Species composition and dominance of communities in the study area

种名拉丁名	生活型	科	各样地植物的优势度			
			草方格	对照	草方格-人工林	对照
对节刺(<i>Horaninovia ulicina</i>)	1 年生草本	藜科	2.27	3.63	4.13	3.70
刺沙蓬(<i>Salsola tragus</i>)	1 年生草本	藜科	6.91			
倒披针叶虫实(<i>Corispermum lehmannianum</i>)	1 年生草本	藜科	0.70	0.92	2.20	1.09
沙蓬(<i>Agriophyllum squarrosum</i>)	1 年生草本	藜科		0.50	0.45	0.06
角果藜(<i>Ceratocarpus arenarius</i>)	1 年生草本	藜科	26.22	0.98	0.16	1.08
雾冰藜(<i>Bassia dasypylla</i>)	1 年生草本	藜科			0.23	
叉毛蓬(<i>Petrosimonia sibirica</i>)	1 年生草本	藜科		0.21	0.83	
白梭梭(<i>Haloxylon persicum</i>)	小半乔木	藜科		0.27		
白茎绢蒿(<i>Seriphidium terrae-albae</i>)	半灌木状草本	菊科		1.97	0.07	0.82
琉璃包菊(<i>Hyalea pulchella</i>)	短命植物	菊科			7.14	5.13
莴苣(<i>Lactuca sativa</i>)	短命植物	菊科	2.80		6.77	0.23
沙蒿(<i>Artemisia desertorum</i>)	多年生草本	菊科	0.98		0.32	0.39
砂蓝刺头(<i>Echinops gmelinii</i>)	短命植物	菊科				0.12
疏齿千里光(<i>Senecio subdentatus</i>)	短命植物	菊科	0.66	3.71		
黄花软紫草(<i>Arnebia guttata</i>)	多年生草本	紫草科	0.20		1.20	1.21
假狼紫草(<i>Nonea caspica</i>)	1 年生草本	紫草科		0.30	2.68	0.47
卵果鹤虱(<i>Lappula patula</i>)	短命植物	紫草科	0.32	1.24		
狭果鹤虱(<i>Lappula semiglabra</i>)	短命植物	紫草科			1.32	1.24
条叶庭荠(<i>Alyssum linifolium</i>)	短命植物	十字花科	0.82	2.15	13.59	11.50
涩芥(<i>Malcolmia africana</i>)	短命植物	十字花科	0.15	0.69	0.74	0.52
卷果涩芥(<i>Malcolmia scorpioides</i>)	短命植物	十字花科	5.95	0.69	3.14	2.90
小花糖芥(<i>Erysimum cheiranthoides</i>)	短命植物	十字花科		2.17		
齿稃草(<i>Schismus arabicus</i>)	短命植物	禾本科	2.66	7.25	12.68	7.05
东方旱麦草(<i>Eremopyrum orientale</i>)	短命植物	禾本科	5.53		7.02	7.99
羽毛三芒草(<i>Aristida pumila</i>)	多年生草本	禾本科	1.91			
直果胡卢巴(<i>Trigonella orthoceras</i>)	短命植物	豆科			9.57	17.01
尖舌黄耆(<i>Astragalus oxyglottis</i>)	短命植物	豆科	2.45	1.44	5.95	3.52
蒙古韭(<i>Allium mongolicum</i>)	多年生草本	百合科		0.28		0.28
异翅独尾草(<i>Eremurus anisopterus</i>)	短命植物	百合科		2.71		3.47
囊果薹草(<i>Carex physodes</i>)	短命植物	莎草科	0.52	47.90	1.55	21.78
角茴香(<i>Hypecoum erectum</i>)	短命植物	罂粟科			1.03	0.62
蛇麻黄(<i>Ephedra distachya</i>)	小灌木	麻黄科		4.05	0.62	1.98
土大戟(<i>Euphorbia turczaninowii</i>)	多年生草本	大戟科		0.06		0.11
小车前(<i>Plantago minuta</i>)	短命植物	车前科				1.84
沙生蝇子草(<i>Silene olgiana</i>)	多年生草本	石竹科	0.42	0.86	3.42	0.36
尖喙牻牛儿苗(<i>Erodium oxyrhinchum</i>)	短命植物	牻牛儿苗科	37.98	11.81	9.79	2.85
簇花芹(<i>Soranthus meyeri</i>)	短命植物	伞形科		2.34		
小花荆芥(<i>Nepeta micrantha</i>)	短命植物	唇形科			3.41	0.68
沙拐枣(<i>Calligonum mongolicum</i>)	灌木	蓼科		0.35		

砂蓝刺头(*Echinops gmelinii*)、小花糖芥(*Erysimum cheiranthoides*)、蒙古韭(*Allium mongolicum*)、异翅独尾草(*Eremurus anisopterum*)、土大戟(*Euphorbia turczaninowii*)、小车前(*Plantago minuta*)、簇花芹(*Soranthus meyeri*)、白梭梭(*Haloxylon persicum*)和沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)虽然在对照样地有所分布(表1),但在2种固沙措施样地内均未发现有自然定居,说明在研究区域内这些物种自然恢复的难度较大。尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrrhynchum*)和角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)在草方格样地内占有极高的优势度,而在草方格-人工林样地内尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrhinchum*)和角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)优势度并不显著,表现为条叶庭荠(*Alyssum linifolium*)、齿稃草(*Schismus arabicus*)、尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrrhynchum*)和直果胡卢巴(*Trigonella orthoceras*)同时占优的结构。

3.2 固沙措施对植物生活型结构的影响

从图2来看,2种措施样地内共出现了5种生活型植物,包括短命植物、1年生草本、多年生草本、半灌木状草本和小灌木。2种措施样地已经由工程扰动后的裸沙地恢复至以短命植物和1年生草本占优的群落,但草方格-人工林样地内植物的生活型结构比草方格样地复杂,出现了半灌木状草本和小灌木,说明草方格-人工林措施更能促进植物生活型结构的恢复。



注:A. 短命植物;B. 1年生草本;C. 多年生草本;D. 半灌木状草本;E. 小灌木。

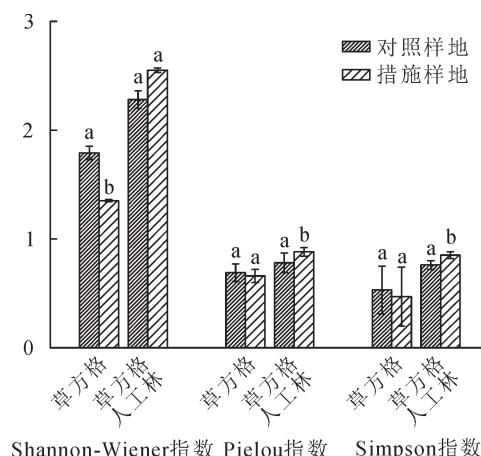
图2 样地内不同生活型植物的优势度

Fig. 2 Dominance of different lifeforms in each sample plot

3.3 固沙措施对植物 α 多样性的影响

通过将2种措施样地内植被物种的Shannon-Wiener多样性指数、Simpson多样性指数和Pielou均匀度指数和对照样地分别进行比较(图3),发现草方格内各多样性指数均较低,且低于对照样地,而草方格-人工林样地内各多样性指数均较高,且高于

对照样地。草方格内Shannon-Wiener多样性指数显著小于($P < 0.05$)对照样地,草方格-人工林样地则与对照样地无显著性差异。草方格-人工林内Simpson多样性指数显著高于($P < 0.05$)对照样地,而草方格与对照样地无显著差异,这说明草方格-人工林内的物种组成比草方格要复杂。草方格、草方格-人工林的Pielou均匀度指数与对照样地均无显著性差异,但表现为草方格样地小于对照样地,草方格-人工林样地大于对照样地,且草方格-人工林样地显著高于草方格样地($P < 0.05$),说明草方格-人工林样地内植物种间的个体数量差异程度比草方格小,均匀度较高。



注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图3 各各样地的多样性指数

Fig. 3 Diversity index of each sample plot

3.4 固沙措施对植物 β 多样性的影响

β 多样性指数可以直观反映不同群落间物种组成的差异^[16],可用相似性和相异性2个测度来表达。本研究选取应用较广泛的Sorenson相似性指数和Cody相异性指数,分别对草方格与其对照样地间和草方格-人工林与其对照样地间植物物种相似(相异)性进行计算,发现前者的相似性指数小于后者,相异性指数则相反(图4)。说明草方格-人工林的铺设能进一步促进植被向相邻自然沙垄上的群落结构恢复。

3.5 固沙措施对土壤养分各指标的影响

将各样地土壤养分指标进行对比(表2),发现草方格样地中有效N含量极显著高于对照样地($P < 0.01$),速效K、全K、全P与对照样地无显著性差异,有效P、全N、有机质极显著低于对照样地($P < 0.01$),说明除了有效P、全N和有机质,其余指标均恢复至自然沙垄水平。在草方格-人工林样地中除了全K与对照样地无显著性差异,其余养分指标均极显著高于对照样地($P < 0.01$)。通过对比2措施样地内土壤养分的富集率(图5),可以看出,

表 2 不同样地土壤养分含量 (mean±SD)

Table 2 Comparison of soil nutrient among different sample plots (mean±SD)

样地类型	有机质 /(g·kg ⁻¹)	全 N /(g·kg ⁻¹)	全 P /(g·kg ⁻¹)	全 K /(g·kg ⁻¹)	有效 N /(mg·kg ⁻¹)	有效 P /(mg·kg ⁻¹)	速效 K /(mg·kg ⁻¹)
草方格	0.27±0.07b	0.02±0.00b	0.18±0.01a	13.81±0.20a	1.83±1.10b	0.68±0.26b	79.50±6.44a
对照	1.17±0.20a	0.07±0.01a	0.19±0.03a	13.63±0.33a	0.92±0.04a	1.87±0.54a	71.58±10.38a
草方格-人工林	0.50±0.10b	0.03±0.00b	0.24±0.02b	11.71±0.25a	3.31±2.08b	1.75±0.41b	173.33±62.27b
对照	0.34±0.08a	0.02±0.01a	0.20±0.02a	11.58±0.27a	0.94±0.05a	1.08±0.30a	74.83±10.25a

注:同列措施样地和对照样地之间不同小写字母表示差异显著($P<0.01$)。

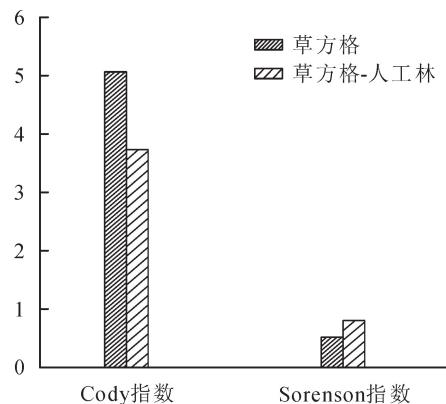


图 4 措施样地与对照样地间的相似性和相异性指数
Fig. 4 Sorenson index and Cody index between sample plot of sand-fixing measures and the vegetation in natural dune

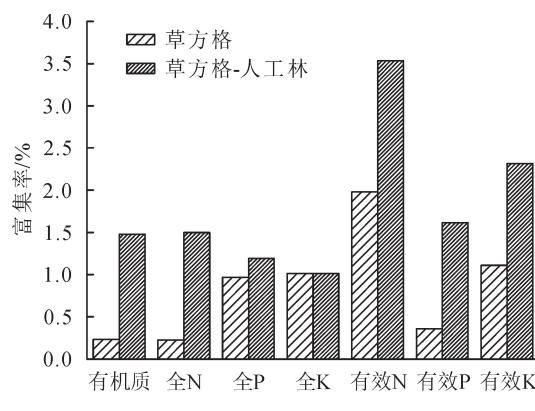


图 5 土壤养分富集率

Fig. 5 Enrichment rates of soil nutrients

除全 K 的富集率基本一致,其余养分指标的富集率均表现为草方格-人工林样地大于草方格样地。

4 讨论

4.1 固沙措施对植被恢复的影响

在干旱荒漠区植被受强烈工程扰动破坏后自然恢复较困难。采取草方格和草方格-人工林综合固沙防护措施,可使沙表面逐渐稳定,为植物定居创造条件^[7,9],这一结论在本研究中得到了充分的验证,研究区在工程扰动造成的裸沙地上分别采取了上述措施,经过 10 余 a 的封育,草方格样地内植物物种丰富度达到了 19,草方格-人工林样地内植物物种丰富度达到了 26,分别占对照样地的 76% 和 90%;植

物多度分别达到了 22 株和 87 株,占对照样地的 18% 和 33%。

已有的研究表明,尖喙牻牛儿苗是古尔班通古特沙漠植物自然恢复中的先锋种,恢复早期具有很高的优势度^[6],随着演替的进行群落中植物的均匀度会逐渐提高^[14]。研究区内草方格样地的植物群落中尖喙牻牛儿苗和角果藜的优势度远大于其他植物种,草方格-人工林样地则表现为条叶庭荠、齿稃草、尖喙牻牛儿苗和直果胡卢巴同时占优的结构,Pielou 均匀度指数显著高于草方格样地($P<0.05$),群落生活型结构也比草方格样地复杂,通过相似性指数和相异性指数的比较,发现草方格-人工林样地的群落结构更接近于自然沙垄,群落的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和多度也较高,因此,可以推测虽然 2 种措施的铺设都分别促进了植被的恢复,但在自然恢复时间相同的条件下,草方格样地植物群落的演替速度明显比草方格-人工林样地慢,目前仍处于演替的早期。

4.2 固沙措施对土壤养分的影响

古尔班通古特沙漠在自然条件下,生物物种相对较丰富,生物结皮广泛发育,因此原始沙表面较稳定^[17],由于受强烈的工程扰动的影响,研究区的沙地上下层土壤进行了充分混合,使得土壤粗颗粒含量增加,养分含量接近于流沙^[14]。本研究发现,2 种固沙措施铺设后,各样地土壤上层(0~20 cm)的养分得到了不同程度的恢复,这与前人的研究结果一致^[18],其主要原因可归纳为以下 2 点:1)土壤中的黏粒由于粒径小,比表面积相当大,因而吸附能力较强,对于颗粒组成较粗的风沙土来说,黏粒含量增加对土壤肥力的提升具有重要意义^[19],人工林的建植和草方格的铺设增大了地表覆盖度和粗糙度,降低了风速,减弱风沙流活动,使得地面不断累积尘埃^[20],增加了土壤中黏粒和粉粒的含量,从而提高土壤中养分含量;2)干旱和半干旱区水资源是土壤养分重新分配的重要因素^[21],古尔班通古特沙漠年平均降水量在 70~150 mm,次降水量多在 10 mm 以下^[22],结皮对降水的截留作用^[23],加之较大的年均蒸发量(>2 000 mm)^[17],限制了土壤中的水溶性养

分离子向深层淋溶,干沙层的存在又会抑制其下水分的蒸发^[24],使研究区内土壤养分在地表积累,致使土壤上层养分含量提高。

干旱荒漠区灌丛的“肥岛”效应普遍存在,灌丛能够通过长期生长对空气中尘埃的拦截、凋落物的分解、根系分泌物和根际微生物的积累等,改善土壤质地,提高土壤养分含量^[25]。人工林的建植为“肥岛”效应的产生创造了条件,本研究发现,草方格-人工林样地内土壤养分各指标中除全K外,其余指标富集率均高于草方格样地,并且各指标值除全K外均极显著高于($P<0.01$)对照样地(自然沙垄),这可能是人工林灌丛“肥岛”效应的结果。草方格样地有效N含量极显著高于对照样地($P<0.01$),土壤速效K、全K、全P已基本恢复至对照样地水平,但有效P、全N、有机质含量仍极显著低于对照样地($P<0.01$),说明虽然草方格的铺设对土壤养分的恢复有一定贡献,但草方格内植物多度较少,土壤养分和植被恢复的相互促进作用比草方格-人工林弱。

需要提出的是,草方格沙障地上部分4a、地下部分7a左右就会完全分解腐烂^[26-27],调查时研究区的草方格已经出现了较严重的风化和分解,这可能影响了后期草方格生态效应的发挥,因此在草方格长期发挥作用的条件下,2种措施效应的差异还有待进一步研究。

5 结论

古尔班通古特沙漠经过工程扰动后,通过采取草方格和草方格-人工林综合防护措施,植物得到了一定程度的恢复,其中草方格样地内植物物种丰富度达到了19,草方格-人工林样地内植物物种丰富度达到了26,植物多度分别达到了22株和87株。草方格-人工林样地内植物多度、丰富度、Shannon-Wiener指数和Simpson指数都大于草方格样地,群落的生活型结构比草方格更复杂,演替速度也更快,说明采用草方格-人工林综合固沙防护措施比草方格措施更有利于植被恢复。

草方格和草方格-人工林综合防护措施的铺设,均对样地内土壤上层(0~20cm)养分的恢复有积极地影响,草方格样地内有效N含量极显著高于对照样地($P<0.01$),速效K、全K、全P均恢复至自然沙垄水平,草方格-人工林样地中除全K恢复至自然沙垄水平外,有机质、速效K、全P、全N、有效N和有效P含量均极显著高于对照样地($P<0.01$)。由于人工林建植产生的灌丛“肥岛”效应,使得草方格-人工林样地内土壤养分的富集率更高,上层(0~20cm)土壤养分含量超过了自然沙垄,表明草方格-人

工林综合固沙防护措施样地具有更快的土壤养分恢复速率。

因此,在古尔班通古特沙漠工程扰动区铺设草方格-人工林综合固沙防护措施比仅仅铺设草方格更有利于生态恢复。

参考文献:

- [1] 陈亚宁,陈亚鹏,朱成刚,等.西北干旱荒漠区生态系统可持续管理理念与模式[J].生态学报,2019,39(20):7410-7417.
CHEN Y N, CHEN Y P, ZHU C G, et al. The concept and mode of ecosystem sustainable management in arid desert areas in Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (20) : 7410-7417. (in Chinese)
- [2] 钱亦兵,张立运,吴兆宁.工程行为对古尔班通古特沙漠植被的破损及恢复[J].干旱区研究,2001,18(4):47-51.
QIAN Y B, ZHANG L Y, WU Z N. Destruction and regeneration of the desert vegetation in the engineering activities in the-Gurbantunggut desert[J]. Arid Zone Research, 2001, 18(4): 47-51. (in Chinese)
- [3] 李生宇,雷加强.草方格沙障的生态恢复作用——以古尔班通古特沙漠油田公路扰动带为例[J].干旱区研究,2003,20(1):7-10.
LI S Y, LEI J Q. The ecological restoration functions of the straw-checker sand-barriers—a case study along the desert highways in the Gurbantonggut desert[J]. Arid Zone Research, 2003, 20(1): 7-10. (in Chinese)
- [4] 常海涛,刘任涛,刘佳楠,等.草方格造林固沙过程中土壤性质变化及分形特征——以腾格里沙漠东南缘为例[J].水土保持学报,2018,32(6):58-65,165.
CHANG H T, LIU R T, LIU J N, et al. Change of soil properties and related fractal features during forestation and sand fixation by straw checkerboard:a case study in southeast edge of-Tengger desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(6):58-65,165. (in Chinese)
- [5] 黄刚,赵学勇,苏延桂,等.科尔沁沙地樟子松人工林对微环境改良效果的评价[J].干旱区研究,2008,25(2):212-218.
HUANG G, ZHAO X Y, SU Y G, et al , Assessment on the effects of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on micro-environment improvement in the Horqin sandy land[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(2): 212-218. (in Chinese)
- [6] 王雪芹,赵从举.古尔班通古特沙漠工程防护体系内的蚀积变化与植被的自然恢复[J].干旱区地理,2002,19(3):201-207.
WANG X Q, ZHAO C J. Sand surface change and natural species entrance in straw barrier system in Gurbantonggute desert, Xinjiang, China[J]. Arid Land Geography, 2002, 19 (3) : 201-207. (in Chinese)
- [7] 王逸敏,刘康,屈建军.沙障对流沙地植被和土壤养分的影响[J].中国沙漠,2019,39(3):56-65.
WANG Y M, LIU K, QU J J. Effects of sand barriers on vegetation and soil nutrient in sand dunes[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(3): 56-65. (in Chinese)
- [8] 李新荣.干旱沙区土壤空间异质性变化对植被恢复的影响[J].中国科学(D辑:地球科学),2005,35(4):361-370.

- LI X R. Influence of soil spatial heterogeneity change on vegetation restoration in arid sand area[J]. Science China, 2005, 35(4): 361-370. (in Chinese)
- [9] 张帅,丁国栋,高广磊,等.不同年限的草方格沙障对生态恢复的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(5):10-15.
- ZHANG S,DING G D,GAO G L,*et al*. Effects of straw checkerboard barrier in different setting years on ecology restoration [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(5): 10-15. (in Chinese)
- [10] 张志伟,尹惠妍,周尧治,等.不同设置年限沙障对沙漠土壤理化性质的影响[J].西北林学院学报,2020,35(5):68-77.
- ZHANG Z W,YIN H Y,ZHOU R Z,*et al*. Effects of sand barriers with different ages on physicochemical properties of desert soil [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020,35(5):68-77. (in Chinese)
- [11] 董智,李红丽,胡春元,等.沙漠公路不同固沙措施防风固沙效益和成本比较研究[J].水土保持研究,2006,13(2):128-130.
- DONG Z,LI H L,HU C Y,*et al*. Research on cost comparison and wind-break and sand-fixing benefits of different sand-fixing measure of highway in desert regions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006,13(2):128-130. (in Chinese)
- [12] 钱亦兵,吴兆宁,张立运,等.古尔班通古特沙漠短命植物的空间分布特征[J].科学通报,2007,52(19):2299-2306.
- QIAN Y B,WU Z N,ZHANG L Y,*et al*. Spatial distribution characteristics of ephemeral plants in Gurbantunggut desert [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52 (19): 2299-2306. (in Chinese)
- [13] 王雪芹,蒋进,雷加强,等.古尔班通古特沙漠短命植物分布及其沙面稳定意义[J].地理学报,2003,58(4):598-605.
- WANG X Q,JIANG J,LEI J Q,*et al*. The distribution of ephemeral vegetation on the longitudinal dune surface and its stabilization significance in the Gurbantunggut desert[J]. Acta Geographica Sinica, 2003,58(4):598-605. (in Chinese)
- [14] 王雪芹,蒋进,张元明,等.古尔班通古特沙漠南部防护体系建成10a来的生境变化与植物自然定居[J].中国沙漠,2012,32(2):372-379.
- WANG X Q,JANG J,ZHANG Y M,*et al*. Habitat change and natural establishment of plants in the southern part of Gurbantunggut desert, China during 10 years since construction of engineering protective system[J]. Journal of Desert Research, 2012,32(2):372-379. (in Chinese)
- [15] 张继义,赵哈林,张铜会,等.科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J].植物生态学报,2004,28(1):86-92.
- ZHANG J Y,ZHAO H L,ZHANG T H,*et al*. dynamics of species diversity of communities in restoration processes in Horqin sandy land[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(1):86-92. (in Chinese)
- [16] 马克平,刘灿然,刘玉明.生物群落多样性的测度方法 II β 多样性的测度方法[J].生物多样性,1995,3(1):38-43.
- [17] 王雪芹,王涛,蒋进,等.古尔班通古特沙漠南部沙面稳定性研究[J].中国科学(D辑:地球科学),2004,36(8):763-768.
- [18] 李新荣,周海燕,王新平,等.中国干旱沙区的生态重建与恢
复:沙坡头站 60 年重要研究进展综述[J].中国沙漠,2016,36(2):247-264.
- LI X R,ZHOU H Y,WANG X P,*et al*. Ecological research and recovery in arid desert regions of China:a review of 60-year research progress of Shapotou desert research and experiment station,China Academy of Science[J]. Journal of Desert Research,2016,36(2):247-264. (in Chinese)
- [19] 李易珺,杨自辉,郭树江,等.青土湖干涸湖底 2 种典型固沙植物群落土壤粒径分布分形特征与养分关系研究[J].西北林学院学报,2020,35(5):62-67.
- LI Y J,YANG Z H,GUO S J,*et al*. The relationship between fractal characteristics of soil particle size and soil nutrients of the soils of two typical sand-fixing plant communities at the bottom of the Qingtuhu lake[J]. Journal of Northwest Forestry University,2020,35(5):62-67. (in Chinese)
- [20] 贾晓红,李新荣,王新平,等.流沙固定过程中土壤性质变异初步研究[J].水土保持学报,2003,17(4):46-50.
- JIA X H,LI X R,WANG X P,*et al*. Primary study of spatial heterogeneity of soil property in process of shifting sand fixation in Southeaster Tengger desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2003,17(4):46-50. (in Chinese)
- [21] Whitford W G,Anderson J,Rice P M. Stemflow Contribution to the ‘fertile island’ Effect in Creosotebush,Larrea Tridentata,1997,35(3):0-457.
- [22] 蒋进,王雪芹,雷加强.古尔班通古特沙漠工程防护体系内土壤水分变化规律[J].水土保持学报,2003,17(3):74-77.
- JIANG J,WANG X Q,LEI J Q. Soil moisture distribution in straw barrier system in Gurbantonggute desert of Xinjiang, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17 (3):74-77. (in Chinese)
- [23] 李昌龙,姜生秀,吴昊,等.梭梭林下土壤结皮发育对降水入渗动态的影响[J].西北林学院学报,2020,35(5):35-40,103.
- LI C L,JIANG S X,WU H,*et al*. Effects of soil crust development on precipitation infiltration dynamics under *Haloxylon ammodendron* plantations[J]. Journal of Northwest Forestry University,2020,35(5):35-40,103. (in Chinese)
- [24] 冯起.半湿润沙地干沙层特性的初步研究[J].干旱区研究,1994,11(1):24-27.
- FENG Q. Preliminary study on the dry sand layer of sandy land in semi-humid region[J]. Arid Zone Research, 1994, 11 (1):24-27. (in Chinese)
- [25] 任雪,褚革新,宋目权,等.准噶尔盆地南缘绿洲——荒漠过渡带梭梭“肥岛”效应特征[J].土壤通报,2010,41(1):100-104.
- REN X,CHU G X,SONG R Q,*et al*. The characteristics of “fertile island” on *Haloxylon ammodendron* at an oasis-desert ecotone in the South edge of Jungger basin[J]. Chinese Journal of Soil Science,2010,41(1):100-104. (in Chinese)
- [26] 刘莹莹,苏妮尔,赵彩鸿,等.落叶松凋落叶水提液对苗圃土壤微生物数量和土壤酶活性的影响[J].森林工程,2020,36(5):24-33.
- [27] 陈祝春,李定淑.草方格沙障腐蚀过程中土壤微生物的作用[J].中国沙漠,1987,7(4):45-48.