

# 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被土壤肥力变化

顾峰雪<sup>1</sup>, 潘晓玲<sup>1\*</sup>, 潘伯荣<sup>2</sup>, 文启凯<sup>3</sup>

(1. 新疆大学干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 3. 新疆农业大学农学院, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:**在极端干旱的塔克拉玛干沙漠腹地, 利用地下咸水(矿化度  $4\sim 5\text{g/L}$ )灌溉建立人工植被后, 不仅改善了当地的生态环境, 也促进了风沙土的成土发育, 使土壤内部发生了一系列的变化, 通过分析测定, 结果表明人工植被建立对流沙的固定和成土发育产生了深刻的影响, 它使土壤内部的各个性质都发生了显著的变化, 土壤物理、化学性质得到改善, 土壤的肥力提高, 这种变化是随着植被建立时间的延长而逐渐增大的。同时由于受到不同植被类型和人为措施的影响, 使得相同种植时间的不同样地, 土壤性质的变化有差异。另外从土壤物理、化学和生物因子等方面出发, 建立了土壤肥力综合评价指标体系, 并利用多元统计方法, 对塔克拉玛干沙漠腹地人工植被建立过程中土壤肥力的变化特征进行综合评价。结果表明, 随着人工植被建立时间的延长, 土壤肥力呈增长趋势, 但由于植被类型和人为措施的不同, 相同种植时间的植被样地, 土壤肥力的变化不同, 变化最为显著的是蔬菜地、花卉地和草地, *IFI* 值分别为 0.689、0.729 和 0.773。

**关键词:**人工植被; 流沙; 成土变化; 土壤肥力; 综合评价

## Changing of Eolian Soil Fertility in Central Taklimakan Desert Under Impact of Artificial Vegetation

GU Feng-Xue<sup>1</sup>, PAN Xiao-Ling<sup>1\*</sup>, PAN Bo-Rong<sup>2</sup>, WEN Qi-Kai<sup>3</sup> (1. *Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi, 830046, China*; 2. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, 830011, China*; 3. *Xinjiang Agriculture University, Urumqi, 830052, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1179~1188.

**Abstract:** Artificial plantations were set up by irrigating saline groundwater (salt content is  $4\sim 5\text{g/L}$ ) in central Taklimakan desert of extremely arid area. Four years later, it changed the ecology environment and landscape of desert, at the same time, soil properties of artificial vegetation have been changed greatly.

Obviously, soil has begun formation processes during the foundation of artificial vegetation, we analysed all changes of soil properties. First, compared with drifting sand dune, the soil profile of vegetation has been changed some: (1) more organic matters accumulate in topsoil; (2) the color of topsoil is more darker because of the influence of root, irrigation and organic fertilizer; (3) more roots throughout the soil profile.

By analyzing the soil particle component of typical plots, the results showed that the soil texture did not change greatly because the time of vegetation building was too short, fine sand ( $0.25\sim 0.05\text{mm}$ ) was still dominant in soil. Different from the drifting sand dune, the content of clay ( $<0.001\text{mm}$ ) and physical clay ( $<0.01\text{mm}$ ) of vegetation soil was more than that of motive sand. Clay is significant important to

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999043503)

收稿日期: 2000-11-05; 修订日期: 2001-12-10

作者简介: 顾峰雪(1974~), 女, 新疆博乐人, 硕士, 讲师。主要从事土壤学、环境学、生态学的研究。gxfxue@sohu.com

\* 通讯联系人 Author for correspondence. xlpn@xju.edu.cn

致谢: 本文在采样和分析过程中受到中国科学院新疆生态与地理研究所的徐海亮、王炜、岳红霞以及新疆农业大学的罗明老师等的大力协助, 在此表示衷心地感谢。

improve the soil fertility. Compared with drifting sand dune, the soil bulk density, porosity and saturated water content all were changed, it means that sand dune developed forward to the good structure soil after the vegetation has been set up.

Saline water irrigating can settle the problem of fresh water pinch in desert. But the saline water can bring the physiological drought to plant root, which affect the plant growth and even cause the plant to die, so the change of salt content in the soil profile is essential to plant and land sustainable development. In central Taklimakan desert, after the artificial vegetation was set up by irrigating the saline water (salt content is 4~5 g/L), the eolian soil salt content in the profile of 50cm has not increased (except topsoil of some plots, such as irrigation experiment field), by contrary, the irrigation water played a salt eluviation part. This is mainly because of the facile transportation of water and air in the sand. Salt accumulated below the depth of 100cm in the profile commonly. Otherwise the change of soil pH is different, the vegetation soil pH is higher than that in drifting sand dune. The change of salt content in soil is important to set up artificial vegetation using saline water in arid areas and to rebuild the degenerative ecosystem.

After the artificial vegetation was set up, the most obvious character of sand is the increasing of soil fertility which indicate the sand begun the process of soil evolution. This paper analyzed the dynamic change of soil fertility after the artificial vegetation was set up from plant nutrient content, amount of microorganisms and soil enzyme activities. By analyzing the content of nutrients, the author found that there were more organic matter, total N, available N, available P than in parent material, but the content of available K was lower than that in parent material. As a whole, after the artificial vegetation was set up, the content of nutrient increased and the fertility advanced, this is coherent with the analysis results of soil microorganism and soil enzyme activities. After the artificial vegetation was set up, the water and organic matter content increased. So the results showed that soil microorganisms - bacteria, fungi, actinomyces are more abundant than those of original soil obviously, the longer the artificial vegetation was set up, the more the microorganisms were. But in the plots which were planted in the same time, the amount of microorganisms were variable because the vegetation, the change of soil physical-chemical properties, the density and type of plant, the growth of plant and the manage measures were different. On the other hand, bacteria were predominant in soil, actinomyces were the second, and fungi the least. The microorganisms in the topsoil were much more than those in subsoil. The biology process is very faint in drifting sand dune so the enzymes excreted by the biology are very few. With the plant began to habitat in the drifting sand dune, the soil enzyme activities were increased mostly. The enzyme activities in the same age and different plant types were different, it was coherent with the change of soil nutrient and microorganisms. Enzymes in topsoil are more active than that in subsoil.

With the system and multivariate statistical method, the author evaluated the soil fertility during the soil forming in the extremely arid region——Taklimakan desert, it could reflect the change of soil fertility and the coupling relationship between the vegetation and soil. Using SPSS analysis software we calculated membership function value, component capacity and weights of soil fertility factors by PCA, then calculated the *IFI* (integrated fertility index) values of all plots. The result shows that soil fertility advanced with the artificial vegetation building. Setting up artificial vegetation in the drifting sand dune, plant has accelerated the biology cycle and accumulation. Affected by all kinds of manage measure and plantations, the soil physico-chemical properties improved, biological activities increased and soil fertility advanced distinctly.

Different plots had the different changes in soil fertility. The *IFI* values indicate that the soil fertility advanced with the time of artificial vegetation extended, and the *IFI* values were different in different plots

because of effect of the different vegetation and manage measure, such as the *IFI* value of one-year seed plot was 0.376. Because of more fertilizer and irrigating water, the *IFI* values of flower field and grassland were 0.689 and 0.729, and the same as the vegetable field, its *IFI* value was higher than seed plot and afforestation field which were planted in the same year of 1995. This result shows the soil fertility is influenced greatly by vegetation type and management measures, especially the amount of fertilization. Among all plots, three plots with the highest soil fertility were flower field, grassland and vegetable field, the *IFI* values were 0.689, 0.729 and 0.773 respectively.

**Key words:** artificial vegetation; drifting sand; soil-forming evolution; soil fertility; comprehensive evaluation

文章编号:1000-0933(2002)08-1179-10 中图分类号:S158.3 文献标识码:A

在位于塔克拉玛干沙漠腹地的塔中油田地区利用地下咸水在流动沙丘上建立人工绿地,经过 4a 的努力,塔中沙漠在景观、生态环境上已初见成效,同时绿地风沙土的内部也在发生着一系列的变化。

流沙由于受风沙活动影响,沙面极不稳定,处于频繁的吹蚀和堆积状况下,生物过程极其微弱,而在母质的成土过程中生物起主导作用。在流沙上建立人工植被,流沙得以固定,促使流沙母质开始成土发育,不断向着土壤形成的方向演变。同时,土壤是植物的主要环境因子之一,植被建立过程,也是植物与土壤相互影响和相互作用的过程,在这个过程中作为土壤本质特征的土壤肥力处于不断地发展变化中。因此,在塔克拉玛干沙漠腹地植被建立过程中土壤物理、化学和生物性质研究的基础上,运用综合评价方法,对不同种植时间和不同植被类型的土壤肥力进行多因子综合比较,分析在流沙上植被建立与土壤肥力的关系,为今后开展极端干旱区风沙土生态系统演替的机理研究打下基础,同时,也为人类研究退化生态系统的恢复和重建提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区自然环境条件

研究区的中三点和联合站位于塔克拉玛干沙漠腹地,两地相距约 7km。这里大部分是高大的复合型沙垄和密集的新月型沙丘链,植被盖度近为 0,在有些丘间低地地下水位较浅,地下水多为咸水,矿化度在 4~5g/L。沙漠腹地年平均气温 12.4℃,降水稀少,年降水量仅 11.05mm,潜在蒸发量却极大,为 3638.6mm。日照时数长,年平均日照百分率 58.5%;年平均风速 2.5m/s,大风频繁,主风方向为东北风。

1.2 材料

1998 年在塔中油田基地的中三点、联合站和沙漠公路 292km 处,依绿地建立时间的先后、栽种植物种类的不同和管理方式的差别,共选择了 10 个具有代表性的样地(表 1)。

1.3 采样方法

按照样地面积大小确定取样点数。在样地内随机布点,取样深度为 0~10cm 和 10~50cm。将同一样地多点所取的土样充分混合,将混合样带回室内分析。

1.4 分析方法

在野外采样的同时,进行了含水量、容重、饱和含水量的测定。室内理化分析主要参照《土壤农业化学常规分析方法》<sup>[1]</sup>进行;微生物类群的数量测定主要参照《土壤微生物分析方法手册》<sup>[2]</sup>和《土壤微生物研究法》<sup>[3]</sup>进行,其中细菌、真菌、放线菌均采用平板法测定;土壤酶活性分析主要参照《土壤酶及其研究法》<sup>[4]</sup>。

1.5 数据分析方法

采用多元统计的主成分分析方法对分析测定的各项数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 人工植被建立过程中流沙的成土发育变化<sup>[5]</sup>

3.1.1 土壤剖面数据 流沙除了沙粒粗细的变化外,剖面分异不明显。在塔克拉玛干沙漠腹地,由于人工植被建立时间较短,风沙土剖面除干湿程度的差异外,剖面分化也不十分明显,但与流沙相比,已经有了

以下的变化:①表层枯枝落叶积累;②表层由于有机肥、灌溉、根系等因素的影响,颜色较流沙母质深;③剖面内有大量根系分布。

表 1 试验样地的基本状况

Table 1 The condition of sample plots

序号 No.	样 地 Plot	种植时间 Time of seedling	植物种类 Plant species	管 理 状 况 Management condition
	流沙对照 1(中三点)			
1	Top of drifting sand (Zhongsandian)			
	流沙对照 2(联合站)			
2	Bottom of drifting sand (Lianhezhan)			
	联合站防护林			
3	Shelterforest of Lianhezhan	1998 年 春季 Spring 1998	柽柳 <i>Tamarix ramosissima</i> 梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i> 沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>	未施肥;半个月沟灌 1 次 No fertilizer; ditch irrigation at frequency of twice a month
	292km 灌溉试验地			
4	Irrigation experiment field	1998 年 春季 Spring 1998	柽柳 <i>Tamarix ramosissima</i> 梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i> 沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>	采取滴灌、沟灌和畦灌 3 种灌溉方式 Taking three irrigation methods: ditch irrigation, sprinkle irrigation and plot irrigation
	中三点苗圃			
5	1a 育苗地 Seed plot of one-year in Zhongsandian nursery	1997 年 春季 Spring 1997	柽柳 <i>Tamarix ramosissima</i> 梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i> 沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>	1997 年施羊粪作基肥,生长期间开沟追施 二铵,尿素,1998 年末施肥。在生长期(4~9 月份)以畦灌方式每月灌溉 2 次 Fertilizing sheep manure as basal manure, furrow dressing (ammonium phosphate and urea) during growth period; no fertilizing in 1998. Plot irrigation at frequency of twice a month during growth period
	中三点苗圃花卉地			
6	Flower field in Zhongsandian nursery	1997 年 春季 Spring 1997	太阳花 <i>Portulaca grandiflora</i> 扫帚苗 <i>Kochia scoparia</i>	1997 年施羊粪作基肥,生长期间追施二铵、 尿素,1998 年追施了羊粪和少量尿素。在生 长期(4~9 月份)以畦灌方式每月灌溉 4 次 Fertilizing sheep manure as basal manure, dressing ammonium phosphate and urea during growth period; fertilizing sheep manure and a bit of urea in 1998. Plot irrigation at frequency of 4 times per month during growth period (from April to September)
	联合站草地			
7	Grassland of Lianhezhan	1997 年 秋季 Autumn 1997	黑麦草 <i>Secale cereale</i> 早熟禾 <i>Poa annua</i> 高山羊茅 <i>Festuca ovina</i> var. <i>brachyphylla</i>	以有机肥(75 000 kg/ hm <sup>2</sup> )、复合磷肥(750 kg/ hm <sup>2</sup> )作为基肥;生长期间以畦灌方式 每天灌溉 1 次,每灌水 3~4 次后追氮肥 52.5 kg/hm <sup>2</sup> 。Fertilizing organic manure (75 000 kg/hm <sup>2</sup> ) and compound phosphate (750kg/hm <sup>2</sup> ) as basal manure; plot irrigation at frequency of once a day, dressing nitrogen after 3 ~ 4 times irrigation
	中三点三角造林地			
8	Sanjiao afforestation field in Zhongsandian	1995 年 春季 Spring 1995	柽柳 <i>Tamarix ramosissima</i> 梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i> 沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>	施羊粪作基肥,1998 年按株追施尿素;以喷 灌方式,1995 年浇地下咸水,1996~1997 年间浇生活污水,每年的 4~9 月份间每月 浇水 1 次 Fertilizing sheep manure as basal manure, dressing urea every strain in 1998; irrigating underground saline water in 1995 and living sewage from 1996 to 1997, irrigating at frequency of once a month during growth period (from April to September)

续表 1

序号 No.	样 地 Plot	种植时间 Time of seedling	植物种类 Plant species	管 理 状 况 Management condition
9	中三点苗圃 3a 育苗地 Seed plot of three-year in Zhongsandian nursery	1995 年 春季 Spring 1995	柽柳 <i>Tamarix ramosissima</i> 梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i> 沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>	仅施羊粪作基肥,畦灌。 Fertilizing sheep manure only as basal manure, plot irrigation.
10	中三点苗圃 3a 蔬菜地 Vegetable field of three-year in Zhongsandian nursery	1995 年 春季 Spring 1995	各种蔬菜 All kinds of vegetables	施羊粪作基肥,同时施二铵、尿素;以畦灌 方式在生长期每 2~3d 灌溉 1 次。 Fertilizing sheep manure as basal manure and ammonium phosphate, urea; plot irrigation at frequency of 1 time per 2~3 days

表 2 典型样地土壤颗粒组成分析(1998-06)

Table 2 Analysis of soil particle component

序号 Plot No.	深度 Depth (cm)	各级颗粒(粒径:mm)含量 Content of all class particles(%)						
		粗沙 Coarse sand	细沙 Fine sand	粗粉粒 Coarse silt	细粉粒 Fine silt	粗粘粒 Coarse clay	粘粒 Clay	物理性粘粒 Physical clay
		1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001	<0.01
2	0~10	23.46	71.62	1.94	0.07	0.39	2.52	2.98
	10~50	7.80	87.57	1.86	0.16	0.13	2.48	2.77
3	0~10	11.49	81.03	4.69	0.10	0.03	2.66	2.79
	10~50	26.36	67.76	2.88	0.33	0.13	2.54	3.00
3	0~10	1.10	92.64	2.78	0.22	0.40	2.86	3.48
	10~50	0.79	93.60	2.93	0.18	0.06	2.44	2.68
7	0~10	17.07	71.85	6.37	1.90	0.20	2.61	4.71
	10~50	30.24	62.67	3.63	0.46	0.89	2.11	3.46
9	0~10	0.00	90.76	5.51	0.49	0.16	3.08	3.73
	10~50	0.00	95.00	1.56	0.68	0.21	2.55	3.44

2.1.2 土壤质地变化 通过对一些典型样地颗粒组成的分析(表 2)发现,由于人工植被建立时间很短,土壤质地没有发生根本的变化,土壤中仍以细沙(0.25~0.05mm)为主,但是与流沙不同的是人工植被下风沙土的粘粒(<0.001mm)和物理性粘粒(<0.01mm)含量有所增加。粘粒由于粒径较小,具有巨大的比表面积,吸附能力强,保水保肥力强,对于颗粒组成较粗的风沙土来说,粘粒含量的增加对土壤肥力的提高具有重要意义<sup>[6]</sup>。

2.1.3 土壤结构的变化 土壤结构的功能在于调节土壤肥力因子——水、肥、气、热状况。良好的土壤结构不仅具有较高的总孔隙度,而且大小孔隙配比也适当,具有多方面的肥力作用。流沙的结构松散,通气透水的大孔隙多,而缺乏保水保肥的小孔隙,总孔隙度也较小。人工植被建立后,由于粘粒含量增加,增加了小孔隙和总孔隙度<sup>[5]</sup>。本文分析了风沙土的一些水分物理性质,结果表明,人工植被建立后,土壤的容重、孔隙度和饱和含水量都有所增加(见图 1),说明人工植被建立后,流沙正向着具有良好结构的土壤方向发展。

2.1.4 土壤养分含量和 pH 的变化 利用地下咸水灌溉,可以解决沙漠中淡水匮乏的困难,保证植物生长

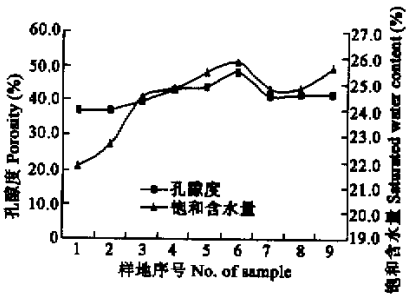


图 1 表层土壤孔隙度、饱和含水量的变化(1998-06)  
Fig. 1 The change of topsoil saturated water content and total porosity

所需水分的供应,利于植物在流沙上的生长。由于根系分布层内的土壤高盐分会造成植物的生理干旱,从而影响植物的生长乃至引起植物的死亡,土壤盐分的变化关系到土地的可持续利用问题。

在塔克拉玛干沙漠腹地,利用 4~5g/L 的地下咸水灌溉建立人工植被,人工植被风沙土的盐分含量在 50cm 范围没有积累(个别样地表层土壤含盐量较高),相反灌溉水起到了淋洗盐分的作用。这主要是由于沙地良好的通透性,利于水分、盐分的下渗,一般盐分在 100cm 以下土层开始积累。土壤的 pH 变化则不同,人工植被风沙土 pH 要高于流沙对照,呈微碱性,pH 值 7~8(见图 2)。人工植被建立后土壤盐分的结果对在沙地利用当地的地下水源建立人工植被,恢复生态环境具有重要意义。

**2.1.5 土壤肥力的变化** 土壤肥力是土壤的本质特征,土壤的成土发育过程,正是土壤肥力由无到有,不断完善,不断发展的过程。因此,在流沙上建立人工植被,流沙开始成土发育最为显著的特征便是土壤肥力的不断提高<sup>[5]</sup>。本文从土壤养分含量、微生物数量和土壤酶活性等方面出发,分析了人工植被建立后土壤肥力的动态变化过程(表 3)。

(1)土壤养分含量的变化 土壤养分的发展是地质大循环和生物小循环共同作用的结果,在母质的成土过程中,生物因素起主导作用。在流沙上因其微弱的生物作用和频繁的风沙活动,其肥力处于极低的水平,植物所需的各种养分含量也很低。通过分析发现(见表 3),流沙上建立人工植被后,土壤中的有机质、全氮、速效氮、速效磷含量均有显著的增加,而速效钾含量则有所降低。植物所需的土壤养分在生物小循环中,是一个积累与消耗的动态过程,影响养分状况的因素是多方面的,同时受人为措施的影响,造成土壤 N、P、K 含量变化的差异。但总体来说,人工植被建立后,土壤养分含量增加,肥力提高,这与土壤微生物、酶活性的分析结果是基本一致的。

(2)土壤微生物数量的变化 土壤微生物对土壤肥力的形成,植物营养的转化,起着重要的作用,因此土壤中的微生物数量可以作为评价土壤肥力的指标之一<sup>[7]</sup>。在沙漠中含量很少的有机质和水分是限制微生物活性的主要因素<sup>[8,9]</sup>。人工植被建立后,沙地水分状况改变,有机质含量增加,因此测定结果也表明(见表 3),微生物三大类群——细菌、真菌、放线菌的数量均有显著的增加,而且人工植被建立时间越长,微生物的数量越多<sup>[10,11]</sup>。但相同种植时间,不同植被类型的样地,由于理化状况、植物种类、密度、生长状况以及人为措施的不同,微生物数量有差异。在微生物的三大类群中细菌数量占绝对优势,放线菌次之,真菌数量最少。表层微生物数量大于下层。

(3)土壤酶活性的变化 土壤酶参与土壤的发生、发展及许多重要的生物化学过程,并与土壤肥力形成密切相关。一般认为土壤酶活性是土壤中生物化学的总体现,可以综合的反应出土壤的肥力水平<sup>[12]</sup>。

流沙生物过程极其微弱,生物分泌释放的酶含量及其活性都非常低。随着流沙上人工植被的建立,沙丘的逐渐固定,土壤酶活性逐渐增强<sup>[13,14]</sup>,酶活性与人工植被建立的时间成正比(见表 3)。相同种植时间,不同植被类型的样地土壤酶活性有差异,这与土壤养分、微生物数量的测定结果一致。表层酶活性也要高于下层。

2.2 土壤肥力综合评价<sup>[15,16]</sup>

流沙上人工植被建立后,流沙开始成土发育,土壤肥力得到不断发展,通过对不同样地土壤性状的分析可以评价土壤肥力的大小。同时运用多元统计分析,对位于极端干旱区的塔克拉玛干沙漠腹地不同种植时间的人工植被土壤肥力进行综合评价,可以反应出人工植被建立过程中土壤肥力的变化情况以及植被与土壤肥力之间的相互作用关系<sup>[15,16]</sup>。

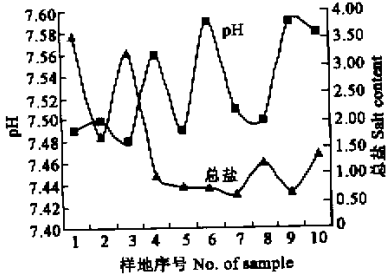


图 2 表层土壤 pH、总盐的变化(1998-06)

Fig. 2 The change of topsoil pH and total salt content



表 3 土壤肥力指标分析(1998-06)

Table 3 Analysis of soil fertility								
序号 Plot No.	深度 Depth	有机质 Organic matter	全氮 Total N	速氮 Available N	速磷 Available P	速钾 Available K	转化酶 Sucrase activity	蛋白酶 Protease activity
	(cm)	(g/kg)	(g/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	( $\mu\text{g}$ 葡萄糖/ g $\pm$ 24h)	( $\mu\text{g}$ 氨基酸/ g $\pm$ 24h)
1	0~10	1.11	0.19	42.04	0.0	177.9	70.20	0.00
	10~50	0.97	0.18	21.77	0.0	184.0	66.05	0.00
2	0~10	1.04	0.19	32.49	0.0	148.9	70.20	0.00
	10~50	0.98	0.18	22.17	0.0	174.9	66.05	0.00
3	0~10	1.19	0.28	20.92	0.0	136.0	82.64	1.64
	10~50	0.99	0.27	30.20	0.0	187.9	71.03	0.00
4	0~10	1.35	0.27	22.98	26.4	124.9	72.69	2.26
	10~50	0.99	0.27	16.90	0.0	111.0	69.37	1.33
5	0~10	1.36	0.36	38.24	5.0	118.5	75.17	1.95
	10~50	1.33	0.38	22.36	8.4	123.9	72.69	1.33
6	0~10	3.96	0.37	35.31	46.8	118.0	85.96	10.31
	10~50	1.89	0.28	22.19	10.2	97.0	70.20	4.15
7	0~10	2.57	0.37	39.92	36.8	81.0	167.24	3.81
	10~50	1.56	0.28	23.49	8.8	71.1	70.20	2.26
8	0~10	1.87	0.46	36.07	17.6	124.5	82.64	4.12
	10~50	1.08	0.38	26.00	0.0	104.8	69.37	1.95
9	0~10	1.70	0.56	35.36	7.4	115.8	82.64	4.12
	10~50	1.07	0.28	21.76	6.0	105.9	67.71	2.57
10	0~10	4.37	0.45	50.86	49.0	131.5	90.93	10.93
	10~50	2.97	0.37	27.75	74.2	135.0	82.64	4.74

序号 Plot No.	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 酶 Peroxidase activity	脲酶 Urease activity	中性磷酸酶 Neutral phosphorease	碱性磷酸酶 Alkaline phosphorease	细菌 Bacteria	放线菌 Actinomyces	真菌 Fungi
	(0.1NK MnO <sub>4</sub> L/g $\pm$ 24h)	( $\mu\text{g}$ NH <sub>3</sub> -N/ g $\pm$ 24h)	( $\mu\text{g}$ 酚/ g $\pm$ 24h)	( $\mu\text{g}$ 酚/ g $\pm$ 24h)	(个/g 干土)	(个/g 干土)	(个/g 干土)
1	0.50	0.00	0.00	0.00	$2.62\times10^4$	$1.85\times10^2$	31.7
	0.45	0.00	0.00	0.00	$7.87\times10^3$	$3.13\times10^2$	$3.13\times10^2$
2	0.45	0.13	0.00	0.00	$4.47\times10^3$	$4.02\times10^2$	$1.01\times10^2$
	0.40	0.00	0.00	0.00	$4.52\times10^2$	$1.01\times10^3$	$3.02\times10^2$
3	1.50	0.15	1.24	0.44	$2.04\times10^6$	$6.82\times10^2$	$2.54\times10^2$
	1.75	0.00	0.008	0.026	$4.22\times10^5$	$1.17\times10^3$	$4.69\times10^3$
4	0.50	0.00	0.53	0.66	$1.28\times10^6$	$7.09\times10^2$	$2.96\times10^2$
	0.35	0.00	0.09	0.055	$3.66\times10^5$	$1.30\times10^3$	$8.02\times10^3$
5	0.60	0.29	1.26	1.60	$9.80\times10^6$	$2.91\times10^5$	$1.04\times10^5$
	0.55	0.00	0.65	0.86	$2.75\times10^6$	$4.52\times10^4$	$1.05\times10^4$
6	1.15	2.55	5.51	4.52	$2.44\times10^7$	$3.53\times10^5$	$1.87\times10^5$
	0.45	0.49	0.59	0.86	$3.41\times10^6$	$1.31\times10^4$	$7.76\times10^4$
7	1.15	1.45	4.32	4.37	$1.17\times10^7$	$1.24\times10^6$	$5.11\times10^5$
	0.80	0.00	0.56	0.56	$1.29\times10^6$	$1.99\times10^5$	$1.09\times10^5$
8	0.95	0.45	3.24	2.43	$1.38\times10^7$	$3.04\times10^5$	$2.53\times10^5$
	0.40	0.00	0.24	0.26	$4.84\times10^6$	$1.87\times10^4$	$1.37\times10^5$
9	0.75	0.60	2.25	2.49	$2.86\times10^7$	$3.54\times10^5$	$2.71\times10^5$
	0.45	0.00	0.29	0.28	$2.40\times10^6$	$1.87\times10^4$	$1.25\times10^5$
10	1.95	2.48	4.47	3.36	$3.28\times10^7$	$1.05\times10^6$	$4.34\times10^5$
	0.70	0.26	2.64	1.83	$8.90\times10^6$	$1.60\times10^4$	$3.63\times10^4$

2.2.1 土壤肥力因子隶属度值与权重、负荷量的计算 土壤肥力是土壤物理、化学和生物性质的综合反映。因此,本研究从这 3 个方面出发,根据各单项肥力指标的代表性和对植被影响的主导性,选择各肥力因子表层(0~10cm)的数据,建立了塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地建立过程中土壤肥力评价指标体系。

由于土壤肥力因子变化具有连续性性质,故各评价指标采用连续性性质的隶属度函数,并从主成分因子负荷量值的正负性,确定隶属度函数分布的升降性,这与各因子对植被的效应相符合。对于土壤容重、pH 值和总盐含量,采用降型分布函数,即:

$$F(X_i) = (X_{i\max} - X_{ij}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$$

(1)

而对土壤饱和含水量、孔隙度及其它各项化学因子和生物因子,采用升型函数,即:

$$F(X_i) = (X_{ij} - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min})$$

(2)

其中, $F(X_i)$ 表示各肥力因子的隶属度值, $X_{ij}$ 表示各肥力因子值, $X_{i\max}$ 和  $X_{i\min}$  分别表示第  $i$  项肥力因子中的最大值和最小值。

根据式(1)和(2)计算了各植被样地肥力因子的隶属度值(表 4)。

表 4 各样地肥力因子的隶属度值

Table 4 Membership function value of soil fertility of the different plots

肥力因子 Fertility factors	样地 1 Plot No. 1	样地 2 Plot No. 2	样地 3 Plot No. 3	样地 4 Plot No. 4	样地 5 Plot No. 5	样地 6 Plot No. 6	样地 7 Plot No. 7	样地 8 Plot No. 8	样地 9 Plot No. 9	样地 10 Plot No. 10
容重 Bulk density $X_1$	0.03	0	0.52	0.58	0.79	0.76	1	0.85	0.82	0.88
饱和含水量 Saturated water content $X_2$	0	0.21	0.67	0.67	0.74	0.89	1	0.75	0.74	0.93
总孔隙度 Total porosity $X_3$	0	0	0.23	0.23	0.55	0.62	1	0.39	0.41	0.42
pH 值 pH value $X_4$	0.91	0.82	1	0.27	0.91	0	0.73	0.82	0	0.09
总盐 Total salt content $X_5$	0	0.63	0.10	0.88	0.95	0.96	1	0.80	0.99	0.75
有机质 Organic matter $X_6$	0.02	0	0.05	0.09	0.10	0.88	0.46	0.25	0.20	1
全氮 Total N $X_7$	0	0	0.25	0.24	0.47	0.50	0.49	0.74	1	0.72
速效氮 Available N $X_8$	0.71	0.39	0	0.07	0.58	0.48	0.63	0.51	0.48	1
速效磷 Available P $X_9$	0	0	0	0.54	0.10	0.96	0.75	0.36	0.15	1
速效钾 Available K $X_{10}$	1	0.70	0.57	0.45	0.39	0.38	0	0.45	0.36	0.52
转化酶活性 Sucrase activity $X_{11}$	0	0	0.13	0.03	0.05	0.16	1	0.13	0.13	0.21
蛋白酶活性 Protease activity $X_{12}$	0	0	0.15	0.21	0.18	0.94	0.35	0.38	0.38	1
脲酶活性 Urease activity $X_{13}$	0	0.05	0.06	0	0.11	1	0.57	0.24	0.24	0.97
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 酶活性 peroxidase activity $X_{14}$	0.05	0	1	0.05	0.14	0.67	0.67	0.29	0.29	0.57
中性磷酸酶活性 Neutral phosphcrease $X_{15}$	0	0	0.23	0.10	0.23	1	0.78	0.41	0.41	0.81
碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphcrease $X_{16}$	0	0	0.10	0.15	0.35	1	0.97	0.55	0.55	0.74
细菌数量 Bacteria $X_{17}$	0	0	0.06	0.04	0.30	0.74	0.36	0.87	0.87	1
放线菌数量 Actinomycetes $X_{18}$	0	0	0	0	0.23	0.28	1	0.28	0.28	0.85
真菌数量 Fungi $X_{19}$	0	0	0	0	0.20	0.37	1	0.53	0.53	0.85

利用 SPSS 分析软件计算各肥力因子主成分的贡献率和累计贡献率,第一主成分的贡献率(69.6%)已足以代表原变量的信息,从分析数据中看到第一主成分对磷酸酶、放线菌、脲酶、真菌有较大的负荷系数,可以认为是土壤中的生物活性大小。所以,以第一主成分分析因子负荷量,计算各肥力因子在土壤肥力中的作用大小,确定它们的权重(表 5)。从表 5 中可见,对人工植被建立过程土壤肥力变化影响较大的有土壤的容重、饱和含水量、有机质、速效磷、蛋白酶活性、脲酶活性、磷酸酶活性和微生物类群的数量等。

2.2.2 土壤肥力综合评价指标值的计算 根据加乘法则,对各个肥力指标值采用乘法进行合成,计算不



同种植时间和不同人为措施的绿地土壤肥力的综合指标值(integrated fertility index, *IFI*), 计算公式如下:

$$IFI = W_i \times F(X_i)$$

式中,  $W_i$  表示各肥力因子的权重向量;  $F(X_i)$  表示各肥力因子的隶属度值, 计算结果如表 6。

表 5 土壤肥力因子的负荷量和权重

Table 5 Values of component capacity and weights of the soil fertility factors																			
肥力因子 Factor	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$	$X_{17}$	$X_{18}$	$X_{19}$
负荷量 Capacity	0.169	0.172	0.163	0.116	0.131	0.167	0.143	0.093	0.165	0.146	0.120	0.165	0.168	0.102	0.184	0.188	0.161	0.166	0.173
权重 Weight	0.058	0.059	0.056	0.040	0.045	0.058	0.049	0.032	0.057	0.050	0.042	0.057	0.058	0.035	0.064	0.065	0.056	0.057	0.060

表 6 各样地肥力的综合指标值(*IFI*)

Table 6 Values of <i>IFI</i> of different plots soil fertility											
样地序号	Plot No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>IFI</i> 值	<i>IFI</i> values	0.114	0.124	0.247	0.241	0.376	0.689	0.729	0.487	0.470	0.773

2.2.3 流沙上人工植被建立过程中土壤肥力的变化 各样地土壤肥力的综合指标值(表 6)也表明,随着植被建立时间的延长,土壤肥力呈增长趋势。在流沙上建立了人工植被后,植物促进了土壤当中的生物循环和生物富集作用。受人工植被和各种人为措施的影响,土壤的理化性质得到改善,生物活性增强,土壤肥力显著提高。

不同样地的土壤肥力增长幅度不一样。从土壤的 *IFI* 值可以看出,从流沙到种植一年的样地到种植 3a 的样地,土壤肥力增长显著,但相同种植时间,不同植被类型的样地,土壤 *IFI* 值有较大差异,如种植 2a 的育苗地为 0.376,而花卉地和草地由于施肥量大,灌溉次数多, *IFI* 值分别为 0.689 和 0.729,要明显高于育苗地,同样种植 4a 的蔬菜地(0.773)也要明显高于造林地和育苗地。这表明由于不同样地植被类型和各种人为措施的不同,土壤肥力有较大差异,在人工植被建立过程中,人工施肥和灌溉以及植被类型的不同对肥力的变化产生了较大的影响,土壤肥力呈渐变性和跳跃性增长特征。在这些样地中土壤肥力最高的是花卉地、草地和蔬菜地, *IFI* 值分别为 0.689、0.729、0.773。

3 结论

(1)在极端干旱的塔克拉玛干沙漠利用咸水灌溉建立人工植被,通过分析表明,随着人工植被建立时间的延长,土壤各理化性质得到改善,微生物数量增加,土壤酶活性增强。

(2)表层(0~10cm)土壤的变化要比下层(10~50cm)显著。土壤养分含量、微生物数量和酶活性均比下层土壤高。

(3)利用 4~5g/L 的咸水灌溉,由于频繁的灌溉和沙地较好的渗透性,0~50cm 土层内盐分含量并未增加,但表层盐分含量要高于下层。因此可以认为在沙漠中可以利用咸水灌溉建立植被,此方法甚至可以推广到绿洲外围,利用农田排水增加盐成土荒漠植被的盖度<sup>[17]</sup>。

(4)相同种植时间,不同植被类型的样地,土壤性质有差异,主要受不同人为措施和植被的影响。

(5)通过主成分分析表明,随着人工植被的建立,流沙开始成土演变,土壤肥力提高,肥力最高的样地为花卉地、草地和蔬菜地。

参考文献

[1] Chinese Soil Science Society(中国土壤学会). *The conventional measurements of soil agricultural chemical analysis* ( in Chinese). Beijing: Science Press, 1983. 45~53.

[2] Xu GF(许光辉), Zheng HY(郑洪元). *Handbook of soil microorganism analysis methods* ( in Chinese). Beijing:

- Agricultural Press, 1986. 91~102.
- [3] Institute of Nanjing Soil Research, CAS(中国科学院南京土壤研究所). *Methodology of Soil Microorganism Research* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1985. 54~59.
- [4] Guan SY(关松荫). *Soil Enzyme and the Method of Research* (in Chinese). Beijing: Agricultural Press, 1986. 14~340.
- [5] Chen WR(陈文瑞). The change of soil properties during afforestation and fixing sand in Shapotou. *Journal of Desert Research* (in Chinese)(中国沙漠), 1981, **1**(1):1~9.
- [6] Dhir R P. The characters and properties of sand dune and eolian soil. *World Desert Research* (in Chinese)(世界沙漠研究), 1989, **9**(1):24~27.
- [7] Chen ZC(陈祝春). The change of soil microorganism of afforestation sand dune in Naiman of Kerqin desert. *Journal of Desert Research* (in Chinese)(中国沙漠), 1992, **12**(3):85~92.
- [8] Rao A V, Venkateswardu B. Microbial ecology of the soils of Indian Desert. *Agriculture Ecosystem and Environment*. 1983, **10**(4):361~370.
- [9] Venkateswardu B, Rao A V. Distribution of microorganism in stabilized and unstabilized sand dunes of the Indian desert. *Journal of Arid Environment*, 1981, **4**:203~207.
- [10] Chen ZC(陈祝春). Soil microorganisms and soil enzyme activities in the course of sand dune crust forming. *Environment Science* (in Chinese)(环境科学), 1991, **12**(1):19~23.
- [11] Shao YQ(邵玉琴) The primary analysis of soil microorganisms amount of sand-fixing engineer stability of artificial vegetation. *Journal of Inner Mongolia University* (in Chinese)(内蒙古大学学报), 1995, **26**(1):19~24.
- [12] Li Y(李勇). Discuss on soil enzyme activities and soil fertility. *Soil Bulletin* (in Chinese)(土壤通报), 1989, **26**(4):190~192.
- [13] Chen ZC(陈祝春). Soil enzyme activities of sand crust in different areas. *Journal of Desert Research* (in Chinese)(中国沙漠), 1989, **9**(1):85~92.
- [14] Frankenberger W J, Dick W A. Relationships between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, **47**(5):945~951.
- [15] Zhang QF(张庆费), Song YC(宋永昌), You WH(由文慧). Relationship between plant community secondary succession and soil fertility in Tiantong, Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese)(生态学报), 1999, **19**(2):174~178.
- [16] Zhang QF(张全发), Zheng Z(郑重), Jin YX(金义兴). Relationship between plant community succession and soil development. *Wuhan Botanical Research* (in Chinese)(武汉植物学研究), 1990, **8**(4):325~332.
- [17] Ji F(季方). Utilization of farmland drainage as resources in the Tarim River valley. *Rural Eco-environment* (in Chinese)(农村生态环境), 2000, **16**(2):1~4.