



# 荒漠草原典型群落土壤粒径和养分的分布特征及其关系研究

李学斌<sup>1</sup>,张义凡<sup>2,3,4</sup>,陈林<sup>2,3,4</sup>,刘学东<sup>2,3,4</sup>,李月飞<sup>2,3,4</sup>,杨新国<sup>2,3,4</sup>

(1 宁夏大学 科学技术处,银川 750021;2 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,银川 750021;3 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地,银川 750021;4 宁夏大学 西部生态与生物资源开发联合研究中心,银川 750021)

**摘要:**为了明确荒漠草原区土壤机械组成与养分的关系,以宁夏盐池荒漠草原4种典型群落为研究对象,通过对不同群落(柠条、沙蒿、蒙古冰草、短花针茅)表层(0~5 cm)、亚表层(5~10 cm)和深层(10~15 cm)土壤粒径分布分形(PSD)、养分含量的动态变化分析,揭示荒漠草原区土壤结构与土壤养分的相关性。结果表明:(1)4种典型群落土壤 PSD 均呈正态分布,不同群落间的土壤 PSD 差异显著,粒径 100~500  $\mu\text{m}$  颗粒含量对 PSD 影响最大,不同群落间的差异大于不同生境间或不同土层间。(2)4种典型群落除全磷(TP)外,其余土壤全肥均随土壤深度增加呈降低趋势,且冠下大于丛间,表现出荒漠草原区特殊的“肥岛”聚集效应,不同群落间分布特征均表现为:柠条>短花针茅>蒙古冰草>沙蒿,速效养分含量相对较高,各群落均达到适宜水平。(3)土壤养分与土壤 PSD 显著相关,除速效磷(AP)外,其余土壤养分与土壤分形维数(D)均呈正相关关系,粒径 100~250  $\mu\text{m}$ 、250~500  $\mu\text{m}$  颗粒与土壤养分呈显著或极显著负相关关系,土壤中的黏粒、粉粒在有机无机胶结过程及土壤良好的结构维持中起主要作用。

**关键词:**荒漠草原;土壤粒径分布;土壤养分

中图分类号:Q948.113

文献标志码:A

## Relationship between Soil Particle Size Distribution and Soil Nutrient Distribution Characteristics in Typical Communities of Desert Grassland

LI Xuebin<sup>1</sup>, ZHANG Yifan<sup>2,3,4</sup>, CHEN Lin<sup>2,3,4</sup>, LIU Xuedong<sup>2,3,4</sup>, LI Yuefei<sup>2,3,4</sup>, YANG Xinguo<sup>2,3,4</sup>

(1 Science and Technology Department of Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-Western China of Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 3 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration of North-Western China, Yinchuan 750021, China; 4 Union Research Center for Ecological and Exploitation of Biological Resources in Western China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** In order to define the relationship between the soil mechanical composition and the nutrient in desert grassland, we studied four typical grassland communities in desert grassland of Yanchi Country, Ningxia. We analyzing the changes of soil particle size distribution (PSD) and the nutrient content of soil surface (0—5 cm), subsurface (5—10 cm), deep soil layer (10—15 cm) in different communities (*Car-*

收稿日期:2017-04-10;修改稿收到日期:2017-06-14

基金项目:国家自然科学基金(41641004,31460123);研究生创新项目(GIP2017004)

作者简介:李学斌(1972—),男,研究员,硕士生导师,主要从事草地生态学、土壤碳循环研究。E-mail: lixuebing@nxu.edu.cn

*gana korshinskii*, *Artemisia ordosica*, *Agropyron mongolicum*, *Stipa breviflora*). We also explored the correlation of soil structure and soil nutrients. The results showed that: (1) soil particle size distribution of four typical grassland communities showed a trend of normal distribution, and significant difference in different communities ( $P < 0.05$ ). The content of particle size of 100—500  $\mu\text{m}$  had a significant influence of PSD. The different communities showed bigger difference than that of different habitats and different layers; (2) In addition to the total phosphorus (TP), soil nutrients decreased gradually with the increase of soil depth. The canopy is greater than the plexus and showed a special “fertilizer island effect” in desert grassland. And distribution characteristics of different communities showed: *C. korshinskii* > *S. breviflora* > *A. mongolicum* > *A. ordosica*. The content of available nutrient was relatively higher and all communities reached the appropriate level; (3) Soil nutrient was significantly correlated with PSD. In addition to the available phosphorus (AP), the soil nutrients were positively correlated with soil fractal dimension (D). The particle sizes of 100—250  $\mu\text{m}$  and 250—500  $\mu\text{m}$  were significantly negatively or extremely significantly negatively correlated with the soil nutrients ( $P < 0.05$  or  $P < 0.01$ ). The clay and silt play a main role in the process of organic and inorganic cement and maintaining a good soil structure.

**Key words:** desert grassland; soil particle size distribution; soil nutrient

土壤粒径分布(PSD)作为反映土壤母质来源、成土过程分级指标<sup>[1]</sup>,不仅可以表示土壤固、液、气三相机械组成比,而且能作为表征土壤的水分和养分持有性能的基本物理参数,体现着土壤结构、肥力状况和土壤养分转化程度及速率等土壤理化和生物学特性。近年来,许多领域通过分形模型计算出土壤团聚体、颗粒和孔隙度的分形维数(D)来定量描述土壤物理结构特征<sup>[2]</sup>。理想的机械组成比例及养分条件,才能具备植物适宜生长所需的水、肥、气、热的土壤结构性和孔隙数量,不同群落类型由于生长植被类型的差异导致进入土壤的凋落物质量和数量不同,土壤养分的种类、数量及有效性也因此不同,进而影响土壤养分的转换、循环和利用率<sup>[3]</sup>。土壤养分直接参与地球生物化学循环过程,通过改善土壤结构而影响植被生长<sup>[4]</sup>,与植被形成反馈体系<sup>[5]</sup>,许多研究表明,土壤中养分丰缺与土壤粒径分布分形关系密切,赵来等<sup>[6]</sup>对水田和张玉斌等<sup>[7]</sup>对农田土壤D值与养分状况进行了分析,二者均得出土壤中的粘粒含量越高,土壤的保肥能力就越强;邹诚<sup>[8]</sup>认为土壤的形成就是粘粒形成与机械组成的变化,粘粒越多,土壤胶体越丰富,吸附性能越强,所吸附的土壤养分越丰富;贾晓红等<sup>[9]</sup>对干旱的荒漠地区进行了研究可知D值与土壤养分呈十分明显的正相关性。所以,土壤养分特性和PSD粒径分形对表明空间效应有很强的说明性,可作为潜在反映土壤物理性质和土壤质量的指标之一<sup>[10]</sup>。因此,分析荒漠草原土壤养分与机械组成之间的关系对荒漠草原生态恢复具有一定的意义。

宁夏盐池是典型的荒漠草原,属于荒漠与典型

草原间的缓冲地带,在生态环境的严酷性和气候的波动性的影响下,其生态系统十分脆弱,具有发生荒漠化的潜在危险,加之风沙危害和超载过牧等自然和人为因素的共同作用使得荒漠草原受到严重威胁,关于该区域大量的研究主要集中在土壤养分的时空变化<sup>[11]</sup>、气候环境<sup>[12]</sup>和人类活动<sup>[13]</sup>对土壤养分的影响,相对忽视了土壤结构对土壤养分及其养分供给能力的影响,尤其对粒径分布与速效养分变化研究较少。鉴于此,本试验选取宁夏东部荒漠草原区退化程度不同的4种典型群落作为研究对象,探讨不同群落类型下土壤结构对土壤养分及其供给能力的影响,以期为荒漠草原生态系统养分平衡以及植被恢复策略提供有益参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏东部地区( $37^{\circ}04' \sim 38^{\circ}10' \text{N}$ ,  $106^{\circ}30' \sim 107^{\circ}41' \text{E}$ ),该区北连毛乌素沙地,南接黄土高原,属典型的中温带大陆性气候,年均气温8.1℃,年均无霜期180 d,年降水量240~350 mm,主要集中在7~9月,占全年降水量的60%以上,且年际变率大,年平均蒸发量2 700 mm。土壤主要以灰钙土为主,表层土多为轻壤土、沙壤土和沙土,结构松散,肥力较低。该区主要植被类型为灌木和旱生禾本科植物,主要植被类型有苦豆子(*Sophora alopecuroides* L.)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、白草(*Pennisetum centrasaticum*)、中华小苦荬(*Ixeridium chinensis*)、等。

### 1.2 采样点设置与样品采集

以宁夏盐池县高沙窝镇草原资源生态监测站附

近的退化荒漠草地作为研究区,选取土地退化程度不同的柠条(*Caragana korshinskii*)、沙蒿(*Artemisia ordosica*)、蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)和短花针茅(*Stipa breviflora*)作为研究对象,于2015年8月以“S”型多点采样法选取9个采样点,分别在每个采样点中灌木带、半灌木带、草本植物带设置了大小为5 m×5 m、2 m×2 m和1 m×1 m的样方,在样方内外按不同土层深度(0~5 cm, 5~10 cm, 10~15 cm)进行分层取样,随机选取3个采样点将同一层土壤样品进行混合,并观测记录样地地表植被分布状况(如表1所示)。采集的土样自然风干,过2 mm土壤筛用于土壤养分含量及土壤粒径结构的测定。使用英国马尔文公司的 Mastersizer3000(英国)激光粒度仪测定土壤PSD(以体积分数计),采用美国农业部(USDA)分类系统<sup>[14]</sup>对土壤粒径进行分级:极粗砂(1 000~2 000 μm)、粗砂(500~1 000 μm)、中砂(250~500 μm)、细砂(100~250 μm)、极细砂(50~100 μm)、粉砂(20~50 μm)和黏粒(<20 μm)7个等级。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 样品测定方法** 土样基本理化性质的测定用常规分析方法:采用电位测定法(水土比2.5:1)测定土壤pH,烘干法测定土壤含水量(water content, WC),环刀法测定土壤容重(bulk density, BD),凯氏定氮法和碱解扩散法分布测定全氮(total nitrogen, TN)和碱解氮(alkali-hydrolyzable nitrogen, AN),并采用NaOH碱熔钼锑抗比色法、碳酸氢钠浸提钼蓝比色法、重铬酸钾外加热法、醋酸铵浸提一火焰光度法分别对土壤全磷(total phosphorus, TP)、有效磷(available phosphorus, AP)、有机碳(soil organic carbon, SOC)及速效钾(available potassium, AK)进行测定。

**1.3.2 分析方法** 常规数据统计分析利用Excel2010软件,采用SPSS22.0、DPS7.05软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)及各因子间的Pearson相关关系评价统计。

**1.3.3 基于土壤PSD的分形维数(D)计算** 基于体积PSD数据,采用Tyler等<sup>[15]</sup>体积分形模型对土壤体积分形维数D进行计算,计算公式为 $\frac{V(r < R_i)}{V_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^{3-D}$ ,式中r为粒径,  $R_i$ 为粒径划分中第i级粒径,  $V(r < R_i)$ 为粒径小于  $R_i$  的土壤颗粒体积,  $V_T$ 为土壤所有颗粒体积,  $R_{\max}$ 为土壤颗粒中最大粒径,本文中  $R_{\max} = 3\,000$ , D为分形维数。上式两边取对数,通过对数曲线的拟合斜率可求D值。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同群落类型下土壤颗粒的粒径分布特征

对4种不同群落不同生境土壤粒径分布分析可知(表2),不同群落类型下土壤粒径均呈正态分布趋势,2~50 μm、50~100 μm颗粒含量占总体积的63.16%~94.87%,<2 μm和>500 μm颗粒含量之和仅占总体积的15%左右;不同群落之间0~15 cm土壤粒径分布规律差异较大,最大差异表现为100~250 μm、250~500 μm粒径的颗粒含量,柠条和沙蒿灌丛中,100~250 μm粒径土壤分布较多,半灌木沙蒿群落中粒径250~500 μm的颗粒含量达到

表1 典型植物群落样地以及植被特征

Table 1 Typical plant community sample area and the characteristics of vegetation

群落类型 Community type	地理位置 Geographical position		灌丛形态特征 Shrub morphology			伴生物种 Associated species
	纬度 Latitude	经度 Longitude	高度 Height/m	基径 Branch diameter/m	冠幅面积 The crown area/m <sup>2</sup>	
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	37°43.27'N	107°21'E	1.23±0.15	1.08±0.21	3.39±0.65	猪毛蒿( <i>Artemisia scoparia</i> )、隐子草( <i>Cleistogenes chinensis</i> )、胡枝子( <i>Lespedeza bicolor</i> )
沙蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	37°56.28'N	107°1.45'E	0.51±0.12	0.56±0.08	1.45±0.23	白草( <i>Pennisetum centrasianicum</i> )、刺沙蓬( <i>Salsola ruthenica</i> )、华北白前( <i>Cynanchum hancockianum</i> )
蒙古冰草 <i>Agropyron mongolicum</i>	37°57.66'N	107°2.51'E	0.43±0.11	0.06±0.11	0.0339±0.65	华北白前( <i>Cynanchum hancockianum</i> )、猫头刺( <i>Oxytropis aciphylla</i> )、胡枝子( <i>Lespedeza bicolor</i> )
短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	37°57.13'N	107°7.79'E	0.154±0.08	0.075±0.01	0.06±0.02	猫头刺( <i>Oxytropis aciphylla</i> )、胡枝子( <i>Lespedeza bicolor</i> )、银灰旋花( <i>Convolvulus ammannii</i> )、刺沙蓬( <i>Salsola ruthenica</i> )

表2 不同群落类型下土壤粒径分布及分形维数变化特征

Table 2 The soil particle size distribution under different community types and characteristics of fractal dimension changes

群落类型 Community type	生境 Habit	土壤 layer/cm	粒径分布 Soil particle size distribution/%						分形维数 Soil fractal dimension(D)	
			<0.01 μm	0.01~2 μm	2~50 μm	50~100 μm	100~250 μm	250~500 μm		
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	冠下 Canopy	0~5	1.04±0.05B	17.32±0.85A	28.97±0.86B	44.95±1.93C	7.25±0.31B	0.42±0.47C	0.00±0.03A	2.96±0.12AB
	5~10	1.18±0.15CD	14.96±0.58B	28.86±3.22C	45.94±0.46C	7.38±2.04B	1.01±0.14B	0.00±0.85A	2.97±0.21A	
沙蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	冠下 Canopy	10~15	2.00±0.73A	19.51±0.57AB	28.77±3.90BC	43.39±3.87BC	6.17±0.85BC	0.11±0.17C	0.00±0.08A	2.97±0.36A
	0~5	1.48±0.03A	17.45±0.86A	26.21±0.97C	44.42±1.53C	9.10±1.36B	0.43±0.35C	0.00±0.32A	2.97±0.32A	
蒙古冰草 <i>Agropyron mongolicum</i>	丛间 Pleous	5~10	1.79±0.17A	19.14±2.27A	29.54±1.33C	42.63±2.83DE	6.80±1.31B	0.11±0.04B	0.00±0.00B	2.96±0.14A
	10~15	1.88±0.51A	19.88±4.87AB	27.36±4.02C	43.07±0.48BC	7.70±0.45B	0.11±0.15C	0.00±0.00A	2.96±0.52AB	
蒙古针茅 <i>Stipa breviflora</i>	冠下 Canopy	0~5	0.48±0.23D	8.70±0.81D	18.35±2.07D	44.82±0.82C	25.25±2.09A	2.41±0.39B	0.00±0.00A	2.92±0.32E
	5~10	0.75±0.02E	8.60±0.94C	17.73±0.69D	40.76±2.29E	27.96±1.45A	4.21±0.70A	0.00±0.00B	2.92±0.17A	
狼尾草 <i>Agrostis capillaris</i>	冠下 Canopy	10~15	0.00±0.00B	1.42±0.13D	17.75±3.22D	47.50±3.67AB	30.06±0.65A	3.26±0.73A	0.00±0.00A	2.94±0.16BC
	0~5	0.85±0.86BC	10.68±0.71C	16.90±1.32D	38.27±1.67D	27.42±1.65A	4.74±0.14A	0.00±0.69A	2.96±0.03BC	
狼尾草 <i>Agrostis capillaris</i>	丛间 Pleous	5~10	0.10±0.17F	2.35±0.83D	19.17±1.34D	47.19±2.48C	27.99±3.00A	3.20±0.11A	0.00±0.00B	2.88±0.08A
	10~15	0.00±0.00B	1.27±0.19D	16.00±2.11D	49.32±2.27A	31.11±3.42A	2.30±0.72B	0.00±0.00A	2.94±0.27BC	
狼尾草 <i>Agrostis capillaris</i>	冠下 Canopy	0~5	0.58±0.25CD	8.28±0.45D	37.20±0.47A	52.22±0.97A	1.73±0.19C	0.00±0.00C	0.04±0.00A	2.91±0.05E
	5~10	0.00±0.00F	2.99±0.30D	38.83±0.88AB	56.04±1.03A	2.13±0.15C	0.00±0.00B	0.68±0.00B	2.95±0.62A	
狼尾草 <i>Agrostis capillaris</i>	0~5	1.41±0.01A	13.16±1.05C	35.50±4.38A	46.79±0.62AB	3.14±0.28BC	0.00±0.00C	0.05±0.00A	2.93±0.34C	
	5~10	0.98±0.24B	11.85±2.00C	36.56±1.08A	48.84±1.97B	1.77±0.13C	0.00±0.00C	0.90±0.00A	2.93±0.09DE	
狼尾草 <i>Agrostis capillaris</i>	丛间 Pleous	10~15	1.58±0.15A	15.13±1.89BC	35.99±1.45A	45.56±0.74ABC	1.73±0.17BC	0.00±0.00C	0.00±0.00A	2.94±0.64C
	0~5	0.89±0.04B	14.31±0.045B	36.44±0.63A	46.42±0.15BC	1.94±0.26C	0.00±0.00C	0.00±0.00A	2.93±0.45DE	
狼尾草 <i>Agrostis capillaris</i>	冠下 Canopy	5~10	1.34±0.07BC	14.26±0.35B	36.72±1.27AB	46.07±0.43C	1.61±0.16C	0.00±0.00B	0.00±0.00B	2.93±0.06A
	10~15	2.00±0.34A	24.30±0.46A	31.93±3.19ABC	40.18±2.10C	1.61±0.35C	0.00±0.00C	0.00±0.00A	2.95±0.09BC	
狼尾草 <i>Agrostis capillaris</i>	丛间 Pleous	0~5	1.55±0.18A	16.35±1.57A	34.81±0.95A	45.44±1.49C	1.85±0.46C	0.00±0.00C	1.13±0.00A	2.94±0.19CD
	5~10	1.53±0.08B	15.98±2.01B	36.01±0.76B	45.16C±1.37D	1.32±0.04C	0.00±0.00B	0.00±0.00B	2.94±0.27A	
	10~15	1.67±0.66A	19.37±2.22AB	34.16±2.30AB	42.40±2.37BC	2.38±2.34BC	0.02±0.02C	0.00±0.00A	2.96±0.35AB	

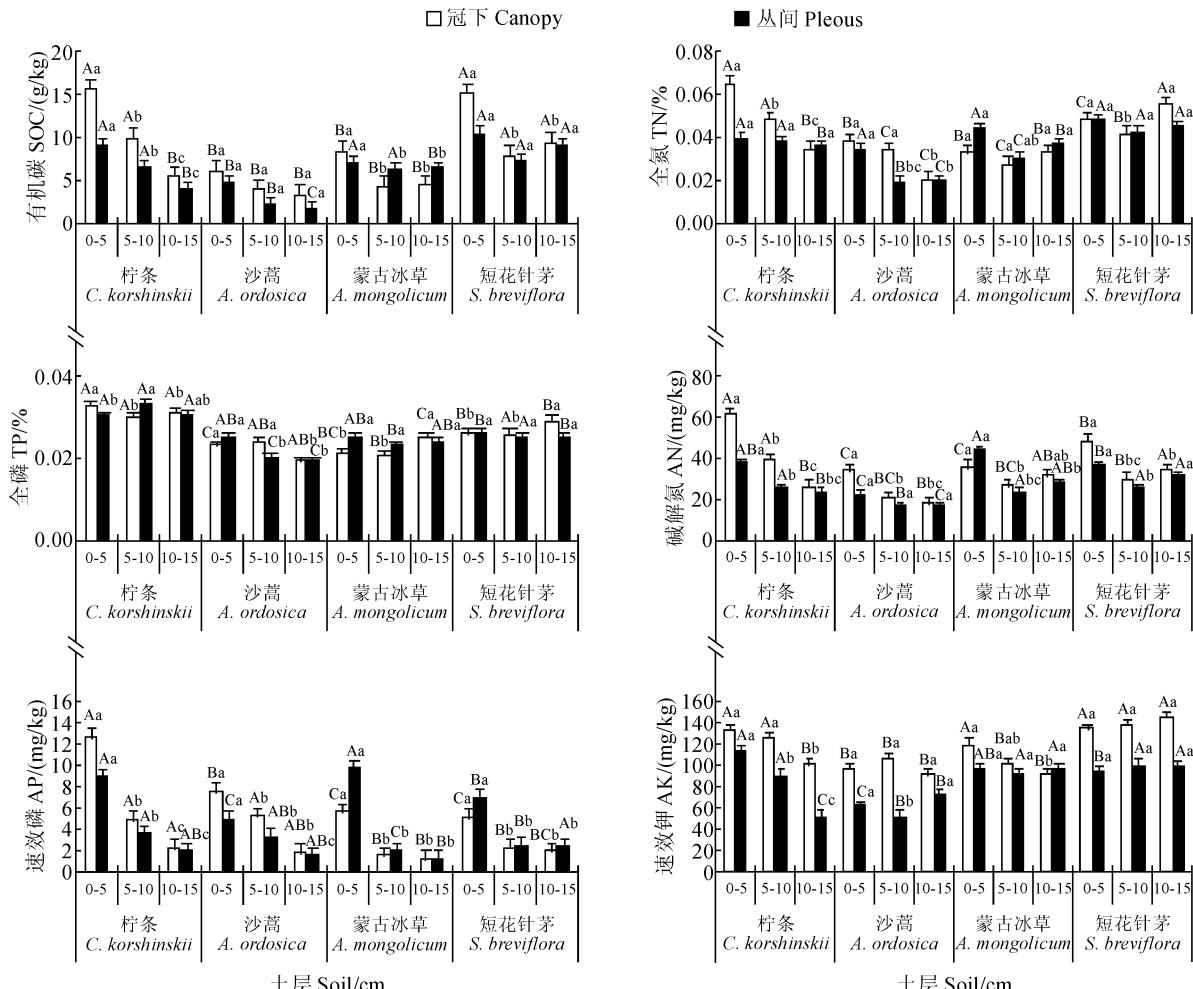
注:不同大写字母表示同一土层不同典型群落之间的显著性差异( $P<0.05$ )Note: Different capital letters indicate significant differences among community types ( $P<0.05$ ) in the same soil layer

2.3%~4.7%,相对而言,沙蒿群落土壤100~250  $\mu\text{m}$ 、250~500  $\mu\text{m}$ 颗粒含量较高,土壤颗粒较大,而草本科的蒙古冰草和短花针茅群落100~250  $\mu\text{m}$ 粒径分布极少,仅占总体积1.60%~3.14%;不同群落之间D差异显著( $P<0.05$ ),沙蒿群落各土层D均小于2.60,蒙古冰草相对短花针茅群落D较小。

## 2.2 不同灌丛群落土壤理化性质的变化

由图1可知,4种典型群落不同生境中除全磷(TP)以外,土壤养分均随土壤深度增加呈降低趋势,且差异显著( $P<0.05$ ),不同生境之间表现为冠下大于丛间,体现了荒漠草原区特殊的“肥岛”聚集效应;4种群落不同生境中土壤有机碳(SOC)含量

在1.91~15.61 g/kg之间变动,整体随土壤深度的增加呈减小趋势,局部生境亚表层出现微小的波动,柠条群落和短花针茅群落SOC含量相对较大,与其他2种群落差异显著( $P<0.05$ );对土壤全肥而言,4种典型群落在同一土层深度均表现为冠下>丛间,不同群落间土壤全氮(TN)和TP表现为:柠条>短花针茅>蒙古冰草>沙蒿,但TN与TP在不同土层中的分布趋势不同,TN随土壤深度的增加呈减少趋势,而TP分布没有一定的规律,根据全国第二次土壤普查养分分级标准<sup>[16]</sup>,荒漠草原中TN含量极度缺乏,均处于VI级水平;对速效养分而言,在不同土层中速效养分的分布规律与SOC相似,即随深度的增加而减小,不同群落之间柠条含量最高,



不同大写字母表示同一土层不同典型群落之间的显著性差异( $P<0.05$ );不同小写字母表示同一典型群落不同土层之间的显著性差异( $P<0.05$ )

图1 不同植被类型下土壤的理化性质

Different capital letters indicate significant differences among vegetation types ( $P<0.05$ ) in the same soil layer; Different normal letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ) among soil layers within the same vegetation type

Fig. 1 The physical and chemical properties of the soil under different vegetation types

冠下表层碱解氮(AN)含量为60.93 mg/kg,达到适宜水平,分别是沙蒿、蒙古冰草和短花针茅的2.945、2.318和2.044倍,差异达到了显著水平( $P < 0.05$ ),其余土层均处于缺乏和极缺乏水平;不同群落冠下表层土有效磷(AP)在5.12~12.58 mg/kg范围内,达到适宜、最适宜水平,丛间变化范围在2.45~9.73之间,柠条和蒙古冰草群落处于适宜水平,其余两种表现为缺乏,柠条和沙蒿群落各土层之间差异均达到显著水平( $P < 0.05$ ),草本科蒙古冰草和短花针茅群落表层AP与深层差异达到显著水平,与亚表层差异不显著( $P > 0.05$ );速效钾(AK)则在不同的群落中表现不同,但相对含量较高,4种群落类型中均处于适宜水平以上,柠条群落AK与SOC分布一致,表层含量分别为133.07、113.90 mg/kg,分别比亚表层和深层高6.99、32.20和23.98、62.50 mg/kg,各土层冠下比丛间分别高19.17、36.16和49.47 mg/kg,其他3种群落群落间、生境间和土层间差异均显著( $P < 0.05$ ),但没有一定的变化规律。

### 2.3 不同群落类型下土壤粒径与土壤养分关系分析

表3显示,除AP以外,所有的土壤养分均与土壤D呈正相关,土壤养分与粒径100~250  $\mu\text{m}$ 、250~500  $\mu\text{m}$ 颗粒含量呈负相关,与其余粒径表现为正相关;土壤SOC与土壤粒径的相关性因生境而不同,冠下与100~250  $\mu\text{m}$ 、250~500  $\mu\text{m}$ 粒径呈显著

负相关( $P < 0.05$ ),与其他粒径含量呈正相关,与2~50  $\mu\text{m}$ 粒径的相关性显著( $P < 0.05$ ),丛间的负相关主要出现在50~100  $\mu\text{m}$ 、100~250  $\mu\text{m}$ 和250~500  $\mu\text{m}$ 粒径范围内,与0.01~2  $\mu\text{m}$ 粒径呈显著正相关( $P < 0.05$ );土壤全肥含量与土壤粒径相关性表现出一致,TN、TP与粒径的相关性和土壤SOC相似,冠下TN主要与0.01~2  $\mu\text{m}$ 和2~50  $\mu\text{m}$ 粒径呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与100~250  $\mu\text{m}$ 和250~500  $\mu\text{m}$ 呈显著负相关( $P < 0.05$ ),TP则与0.01~2  $\mu\text{m}$ 和>500  $\mu\text{m}$ 的粒径呈显著正相关( $P < 0.05$ ),负相关均未达到显著水平( $P > 0.05$ );土壤速效养分与土壤PSD的关系复杂,AN与粒径的关系与生境有关,冠下AN与<100  $\mu\text{m}$ 的小颗粒含量呈正相关,2~50  $\mu\text{m}$ 粒径与之呈显著相关,与>100  $\mu\text{m}$ 的粗颗粒呈负相关,显著负相关出现在100~250  $\mu\text{m}$ 和250~500  $\mu\text{m}$ 范围内,丛间负相关主要在50~100  $\mu\text{m}$ 、100~250  $\mu\text{m}$ 和250~500  $\mu\text{m}$ 粒径范围内,AP冠下与粒径的关系与AN相似,但相关性均不显著( $P > 0.05$ ),丛间AP与2~50  $\mu\text{m}$ 和50~100  $\mu\text{m}$ 粒径呈负相关,其余均为正相关,且与>500  $\mu\text{m}$ 的粒径呈显著正相关( $P < 0.05$ );AK在冠下只与100~250  $\mu\text{m}$ 和250~500  $\mu\text{m}$ 粒径呈显著负相关( $P < 0.05$ ),与2~50  $\mu\text{m}$ 呈显著正相关,丛间则与<50  $\mu\text{m}$ 的粉黏粒呈正相关,其余粒径均表现为负相关且相关性不显著。

表3 典型群落类型下土壤D、粒径分布与理化性质的相关系数

Table 3 The correlation coefficient between soil fractal dimension, particle size distribution and the physical and chemical properties under the typical community type

土壤结构 Soil fractal	有机碳 SOC/(g/kg)		全氮 TN/(g/kg)		全磷 TP/(g/kg)		碱解氮 AN/(mg/kg)		速效磷 AP/(mg/kg)		速效钾 AK/(mg/kg)	
	冠下 Canopy	丛间 Pleous	冠下 Canopy	丛间 Pleous	冠下 Canopy	丛间 Pleous	冠下 Canopy	丛间 Pleous	冠下 Canopy	丛间 Pleous	冠下 Canopy	丛间 Pleous
D	0.42	0.48	0.50	0.45	0.54	0.50	0.18	0.51	-0.26	-0.05	0.23	0.39
<0.01 $\mu\text{m}$	0.33	0.51	0.51	0.59 *	0.52	0.73 * *	0.20	0.52	0.17	-0.03	0.09	0.49
0.01~2 $\mu\text{m}$	0.55	0.59 *	0.64 *	0.69 * *	0.63 *	0.79 * *	0.37	0.59 *	0.06	0.09	0.25	0.57
2~50 $\mu\text{m}$	0.72 * *	0.28	0.71 * *	0.19	0.25	0.12	0.63 *	0.26	0.16	-0.32	0.69 *	0.46
50~100 $\mu\text{m}$	0.08	-0.26	0.02	-0.52	-0.13	-0.56	0.21	-0.30	0.16	-0.30	0.31	-0.19
100~250 $\mu\text{m}$	-0.79 * *	-0.42	-0.81 * *	-0.36	-0.48	-0.350	-0.67 *	-0.41	-0.17	0.19	-0.68 *	-0.53
250~500 $\mu\text{m}$	-0.77 * *	-0.38	-0.83 * *	-0.28	-0.50	-0.37	-0.67 *	-0.32	-0.17	0.27	-0.66 *	-0.48
500~1 000 $\mu\text{m}$	-0.05	0.27	0.07	0.36	0.65 *	0.17	-0.07	0.47	-0.04	0.76 * *	0.07	-0.07
1 000~2 000 $\mu\text{m}$	0.04	0.29	0.06	0.38	0.59 *	0.18	-0.09	0.48	-0.05	0.77 * *	0.08	-0.06
2 000~3 000 $\mu\text{m}$	0.04	0.30	0.06	0.39	0.59 *	0.20	-0.09	0.50	-0.05	0.78 * *	0.08	-0.04

注: \* 和 \*\* 分别表示0.05和0.01水平下显著相关

Note: \* and \*\* indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 significant level, respectively

### 3 讨 论

#### 3.1 不同群落类型土壤粒径组分分布

土壤粒径分形是土壤物理性质的重要表征指标之一,自 Tyler 等<sup>[15]</sup>提出利用土壤粒径分布计算分形维数的方法,已被广泛应用于土壤结构、土壤肥力、土壤退化和土壤侵蚀等研究中<sup>[17-18]</sup>。本研究 4 种群落土壤颗粒集中分布在 2~50  $\mu\text{m}$  和 50~100  $\mu\text{m}$  范围内,粒径<0.01  $\mu\text{m}$  和>500  $\mu\text{m}$  的土粒所占比例非常小,这与采样地点位于宁夏东部的荒漠草原有关,该地非地带性土壤以风沙土和盐碱土为主,程曼等<sup>[19]</sup>在宁南山区的研究也得出相似结论;由于同一采样点土壤母质来源相同,土壤 PSD 在不同群落类型之间差异显著( $P<0.05$ ),沙蒿相对其他群落土壤质地较粗,100~250  $\mu\text{m}$ 、250~500  $\mu\text{m}$  颗粒较多,植被群落的分布导致微环境差异和地表干扰的形成,不同植被分布格局同时促进了微环境的形成<sup>[20]</sup>,结合图 1 不同群落区域的环境因子、植被特征可知沙蒿群落较高的酸碱度加速了土壤盐碱化,土壤细砂、黏粒和土壤养分的流失加速,导致沙蒿群落质地变粗、土壤结构破碎;其次,植物枯枝落叶是土壤有机质的主要来源之一,由于不同植被类型地上部分生长的差异性,对土壤颗粒大小和土壤气候和水热条件都有很大的影响。结合表 1 分析可知,柠条群落是荒漠草原主要的固沙和放牧植物,面积分布广泛,适口性较好,放牧区的承载量较大,使得土壤结构性能改变;土壤 PSD 与植被生长特性密切相关,沙蒿属典型的丛生植物,分枝多且密集、耐沙埋土掩、能够有效降低地表风速、固定原有细粒物质免遭吹蚀,拦截大气中的粉尘物质,使之在障内堆积,增加了粗砂粒和黏粒的分布,对土壤粒径复杂分布产生较大的影响,这与茹豪等<sup>[21]</sup>对黄土高原土壤粒径分形特征的研究结果一致。由此可知,灌丛植被类型与生存环境相互反馈,相互促进,间接影响土壤结构与性状的改良<sup>[22]</sup>。

#### 3.2 不同群落类型土壤养分变化特征

植被生长影响地表降雨产、汇流特征和地表资源再分配过程<sup>[23]</sup>,间接影响地上生物量、物种丰富度以及外界活动。在荒漠草原地区由于灌丛独特的分布特征使得草地呈岛状散布,植被分布具有明显的斑块状景观格局<sup>[24]</sup>,在灌丛化过程中灌丛堆土壤养分含量呈现增加趋势,丛间养分分布较均一,使得灌丛堆积比丛间有更肥沃的土壤,这种空间异质性随着灌丛斑块自身扩展而趋于增强,从而导致灌丛

堆出现了一种特殊的“肥岛效应”<sup>[25]</sup>,究其原因在于此研究区风蚀作用强烈,风力搬运、水土流失以及灌木植物对土壤结构和土壤微环境的改变。本研究 0~15 cm 土层 TN、AN、TP、AP 在不同群落之间形成显著的差异,风蚀物、凋落物促进了灌丛下土壤养分的积累,同时,灌木的根系及微生物活动等作用也为土壤养分的富集和保护起了较大作用。有专家<sup>[26]</sup>研究指出,在干旱、半干旱地区,冠下土壤的 SOC、TN、TP 等土壤养分富集表现出的“肥岛”现象比较典型,这也与灌丛植被在生长过程中对所处环境的适应性有关。有研究得出土壤养分与植物根系的分泌物有很大的相关性,柠条距树基越远的根系所占生物量比例就越小<sup>[27]</sup>;杜峰等<sup>[28]</sup>在黄土丘陵区的研究认为,植物群落生物量对土壤 SOC、TN、TP、AK 和 AP 含量有正效应;郑秋红等<sup>[29]</sup>在怀来盆地的研究也发现了相同的效果。根据当地实际情况可预测,柠条林土壤养分含量远远大于半灌木沙蒿群落,原因在于采样时间对此研究结果产生了极大的影响,柠条林在盐池是主要的放牧植被物种之一,自进入 9 月份以来,放牧强度明显增大,单位面积粪便排泄量也急剧增加,从而使得表层土壤 TN 和 AN 含量升高,这与石永红等<sup>[30]</sup>对土壤理化性质在放牧效应下的研究结果一致。土壤 TP、AP 含量在不同群落中各土层无太大变化,说明短期的放牧对草地磷养分含量无太大影响,这与戎郁萍<sup>[31]</sup>的研究结果相似。

#### 3.3 土壤粒径组分分布与养分的关系

土壤体积分形维数可以用来描述土壤颗粒的几何参数值,用来反映空间填充程度,其数值大小与土壤质地有密切相关性,随着土壤填充物的增多,土壤紧实度增大,保水保肥能力也随之增强,进而土壤体积 D 值也由小变大<sup>[32]</sup>。土壤体积 D 可以较好地表征荒漠草原土壤结构特征及其变化趋势<sup>[33]</sup>,因此,经常作为评价荒漠草原土壤演变的一项综合性定量指标,为沙漠化防治与恢复提供有益的理论参考<sup>[34]</sup>。土壤 SOC 影响土壤水分关系和侵蚀潜力,是植物养分元素循环的焦点,对土壤结构维持与巩固有很大的影响<sup>[35]</sup>。结合表 2、表 3 可知,在荒漠草原农牧过渡带,灌木柠条林有较强的降风滞尘、防风固沙的重要作用,能有效截获和聚集粉粒、细砂粒及植被的凋落物,使冠下土壤的粉粒、细砂粒所占土壤机械组成比例明显增高。结合图 1 可知灌丛下土壤的水分含量明显高于丛间,有机质等土壤养分增加,改善了冠下的土壤结构和土壤理化性质,这是荒漠

草原地区灌丛“肥岛”效应形成的主要原因之一；再次，植被生存过程中，植物的根际分泌物对冠下土壤的理化性质影响作用较强，分泌物通过化学分解作用，与根际微生物-灌丛根系-土壤形成交互影响土壤的生物化学过程，这种胶结贯穿作用是导致土壤物理化学形态改变的主要作用力，也是“肥岛”效应形成的另一个重要因素<sup>[36]</sup>。为明确土壤肥岛形成与土壤结构的相关性，对其作分析可知，土壤粒径与养分之间相关性显著，土壤中粒径小的黏粒、粉粒是与有机质胶结的主要无机胶体，其为胶结作用提供了胶结环境和胶结动力，能对土壤良好的结构性能起到一定的保护作用，这与刘金福等<sup>[2]</sup>在中亚热带森林和苏永中<sup>[37]</sup>在科尔沁沙地的研究结果一致。土壤体积D的变化不仅可以全面地揭示土壤结构变化特征、环境及生物因素的作用强度，而且也可用以揭示土壤对环境变化的响应特点和土壤演变趋势，因此土壤体积分形能作为客观反映土壤肥力特征的指标之一，在土壤肥力诊断指标等方面具有很

好的应用潜力<sup>[9]</sup>。

## 4 结 论

土壤 PSD 均呈“倒 V”型分布特征，粒径 100~500  $\mu\text{m}$  颗粒的机械组成比例明显影响土壤分形维数 D，不同群落类型间的土壤粒径分形维数差异显著 ( $P < 0.05$ )，不同群落间差异大于不同生境和不同土层之间；4 种典型群落类型中除 TP 以外，其余土壤全肥均随土壤深度增加呈降低趋势，冠下大于丛间，表现出了荒漠草原群落特殊的“肥岛”聚集效应，总体全肥含量低，速效养分含量相对较高，不同群落类型均达到适宜水平；土壤养分与土壤 PSD 显著相关，除 AP 以外，其余土壤养分与土壤分形维数 D 均呈正相关，粒径 100~250  $\mu\text{m}$ 、250~500  $\mu\text{m}$  颗粒与土壤养分呈显著或极显著负相关，土壤中粒径小的黏粒、粉粒在有机无机胶结过程及土壤良好的结构维持中起主要作用。

## 参 考 文 献：

- [1] LI Y, LI M, HORTON R. Single and joint multi fractal analysis of soil particle size distributions[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(1): 75-83.
- [2] 刘金福, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分维特征[J]. 生态学报, 2002, 22(2): 197-205.  
LIU J F, HONG W, WU C Z. Fractal features of soil clusters under some precious hardwood stands in the central subtropical region, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (2): 197-205.
- [3] 苏静, 赵世伟, 马继东, 等. 宁南黄土丘陵区不同人工植被对土壤碳库的影响[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 50-52.  
SU J, ZHAO S W, MA J D, et al. Influence of man-made vegetation on carbon pool in southern Ningxia region in Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(3): 50-52.
- [4] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C : N : P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [5] 成毅, 安韶山, 李国辉, 等. 宁夏黄土丘陵区植被恢复对土壤养分和微生物生物量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18 (2): 261-266.  
CHENG Y, AN S S, LI G H, et al. Soil nutrient and microbial biomass in the Loess hilly area of Ningxia under different plant rehabilitation patterns[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(2): 261-266.
- [6] 赵来, 吕成文. 土壤分形特征与土壤肥力关系研究——以皖南地区水稻土为例[J]. 土壤肥料, 2005, (6): 7-11.  
ZHAO L, LÜ C W. Study on relation between fractal features and fertility of soil——take paddy soil in southern area of Anhui Province for example[J]. *Soils and Fertilizers*, 2005, (6): 7-11.
- [7] 张玉斌, 曹宁, 许晓鸿, 等. 吉林省低山丘陵区水土保持措施对土壤颗粒组成和速效养分影响分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 287-291.  
ZHANG Y B, CAO N, XU X H, et al. The analysis of soil particle composition and available nutrient under different soil and water conservation measures in Jilin low mountain and mound area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(20): 287-291.
- [8] 邹诚, 徐福利, 闫亚丹. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤机械组成和速效养分影响分析[J]. 中国农学通报, 2008, 24(12): 424-427.  
ZOU C, XU F L, YAN Y D. The analysis of soil mechanical composition and available nutrient under different land uses patterns in the loess hilly gully region[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(12): 424-427.
- [9] 贾晓红, 李新荣, 张景光, 等. 沙冬青灌丛地的土壤颗粒大小 D

- 空间变异性分析[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2 827-2 833.
- JIA X H, LI X R, ZHANG J G, et al. Spatial heterogeneity analysis of fractal dimension of soil particle for *Ammopiptanthus mongolicus* shrub[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2006, 26(9): 2 827-2 833.
- [10] 淮 态, 庞奖励, 文 青, 等. 不同土地利用方式下土壤粒径分布的分维特征[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(2): 41-44.
- HUAI T, PANG J L, WEN Q, et al. Fractal characteristics of particle size distribution in soils different in land use[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(2): 41-44.
- [11] 杨 阳, 刘秉儒, 宋乃平. 人工柠条灌丛密度对荒漠草原土壤养分空间分布的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(5): 107-115.
- YANG Y, LIU B R, SONG N P, et al. The effect of planted *Caragana* density on the spatial distribution of soil nutrients in desert steppe[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(5): 107-115.
- [12] 孙小丽, 康萨如拉, 张 庆, 等. 荒漠草原物种多样性、生产力与气候因子和土壤养分之间关系的研究[J]. 草业学报, 2015, 24(12): 10-19.
- SUN X L, KANG S R L, ZHANG Q, et al. Relationship between species diversity, productivity, climatic factors and soil nutrients in the desert steppe[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(12): 10-19.
- [13] 孙世贤, 卫智军, 陈立波. 放牧强度季节调控对短花针茅荒漠草原土壤养分的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 748-754.
- SUN S X, WEI Z J, CHEN L B. Effects of seasonal regulation of grazing intensity on soil nutrients in *Stipa breviflora* desert grassland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(5): 748-754.
- [14] 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [15] TYLER SW, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 362-369.
- [16] 田 雨, 庄 莹, 曹 义, 等. 雾灵山低山区土地利用类型对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 41-44.
- TIAN Y, ZHUANG Y, CAO Y, et al. Effects of land use on soil physical and chemical properties in Hilly areas of Wuling Mountain[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(6): 41-44.
- [17] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550.
- WANG G L, ZHOU S L, ZHAO Q G. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 545-550.
- [18] XU P, YU B M. Developing a new form of permeability and Kozeny-Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry[J]. *Advances in Water Resources*, 2008, 31(1): 74-81.
- [19] 程 曼, 朱秋莲, 刘 雷, 等. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(9): 2 835-2 844.
- CHENG M, ZHU Q L, LIU L, et al. Effects of vegetation on soil aggregate stability and organic carbon sequestration in the Ningxia Loess Hilly region of northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(9): 2 835-2 844.
- [20] BROCCA L, TULLO T, MELONE F, et al. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 422-423: 63-75.
- [21] 茹 豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 4(46): 176-182.
- RU H, ZHANG J J, LI Y T, et al. Fractal features of soil particle size distributions and its effect on soil erosion of loess plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 4(46): 176-182.
- [22] 王 德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析—以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 3 082-3 089.
- WANG D, FU B J, CHEN L D, et al. Fractal analysis on soil particle size distributions under different land use types: area study in the loess hill years of the loess plateau, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 3 082-3 089.
- [23] BOEKEN B, ORENSTEIN D. The effect of plant litter on eco-system properties in a Mediterranean semi-arid shrubland[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2011, 12(6): 825-832.
- [24] 潘 军, 安超平, 吴旭东, 等. 荒漠草原 2 种锦鸡儿灌丛化过程中土壤养分分布规律[J]. 水土保持学报, 2015, 12(6): 131-136.
- PAN J, AN C P, WU X D, et al. Distribution pattern of soil nutrients in the thicketization of 2 types of *Caragana* in desert steppe[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 12(6): 131-136.
- [25] SCHLESINGER W H, RAIKES J A, HARTLEY A E, et al. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems[J]. *Ecology*, 1996, 77(2): 364-374.
- [26] 裴世芳, 傅 华, 陈亚明, 等. 放牧和围封下霸王灌丛对土壤肥力的影响[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 763-767.

- PEI S F, FU H, CHEN Y M, *et al.* Influence of *Z. xanthoxylum* shrubs on soil fertility in enclosure and grazing conditions[J]. *Journal of Desert Research*, 2004, **24**(6): 763-767.
- [27] 史建伟,王孟本,陈建文,等.柠条细根的空间分布特征及其季节动态[J].生态学报,2011,31(3):726-733.
- SHI J W, WANG M B, CHEN J W, *et al.* The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a mature *Caragana korshinskii* plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(3):726-733.
- [28] 杜 峰,梁宗锁,徐学选,等.陕北黄土丘陵区撂荒草地群落生物量及植被土壤养分效应[J].生态学报 2007, **27**(5): 1 673-1 683.
- DU F, LIANG Z S, XU X X, *et al.* The community biomass of abandoned farm-land and its effects on soil nutrition in the loess hilly region of northern Shaanxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(5):1 673-1 683.
- [29] 郑秋红,张 宏,贾海坤,等.怀来盆地弃耕地自然恢复过程中土壤养分动态[J].生态与农村环境学报,2006, **22**(1): 24-28.
- ZHENG Q H, ZHANG H, JIA H K, *et al.* Dynamics of soil nutrients during natural recovery process of abandoned farm-land in Huailai basin, Hebei Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, **22**(1):24-28.
- [30] 石永红,韩建国,邵新庆,等.奶牛放牧对人工草地土壤理化特性的影响[J].中国草地学报,2007, **29**(1): 24-30.
- SHI Y H, HAN J G, SHAO X Q, *et al.* Effects of dairy cows grazing on soil physical and chemical properties of alfalfa-grass pasture in agro-pastoral transitional zone of north China[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2007, **29**(1): 24-30.
- [31] 戎郁萍,韩建国,王 培,等.放牧强度对草地土壤理化性质的影响[J].中国草地,2001, **23**(4):41-47.
- RONG Y P, HAN J G, WANG P, *et al.* The effects of grazing intensity on soil physics and chemical properties [J]. *Grassland of China*, 2001, **23**(4):41-47.
- [32] STUBBS M M, PYKE D A. Available nitrogen: a time-based study of manipulated resource islands[J]. *Plant and Soil*, 2005, **270**(1):123-133.
- [33] 张世熔,邓良基,周 倩,等.耕层土壤颗粒表面的D及其与主要土壤特性的关系[J].土壤学报,2002, **39**(2):221-226.
- ZHANG S R, DENG L J, ZHOU Q, *et al.* Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationships with soil properties[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(2):221-226.
- [34] 毛龙江,刘晓燕,许叶华.南京江北地区下蜀黄土粒度分形与全新世环境演变[J].中国沙漠,2006, **26**(2):264-267.
- MAO L J, LIU X Y, XU Y H. Grain-size fractal distribution of Xiashu loess and Holocene environmental change in north of Yangtze River Nanjing[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, **26**(2):264-267.
- [35] HAN G D, HAO X Y, ZHAO M L, *et al.* Effect of grazing intensity on carbon and nitrogen in soil and vegetation in a meadow steppe in Inner Mongolia[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, **125**: 21-32.
- [36] 赵哈林,苏永中,张 华,等.灌丛对流动沙地土壤特性和草本植物的影响[J].中国沙漠,2007, **27**(3):385-390.
- ZHAO H L, SU Y Z, ZHANG H, *et al.* Multiple effects of shrub on soil properties and under story vegetation in Horqin sand land, Inner Mongolia[J]. *Journal of Desert Research*, 2007, **27**(3):385-390.
- [37] 苏永中,赵哈林.科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J].生态学报,2004, **24**(1):71-74.
- SU Y Z, ZHAO H L. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin sandy land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(1): 71-74.

(编辑:潘新社)