

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

常海涛¹, 刘任涛¹, 刘佳楠¹, 赵娟¹, 罗雅曦², 张静², 马继²

(1. 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; 2. 宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要: 以腾格里沙漠东南缘草方格人工固沙植被区为研究对象, 分别选取流动沙地、4年和30年固沙植被区为研究样地, 于春季、夏季和秋季研究了草方格造林固沙过程中土壤性质变化及分形特征。结果表明: (1) 土壤含水量与土壤pH既受到不同固沙年限的影响, 亦受到季节变化的调控。(2) 流动沙地、4年和30年固沙植被区土壤电导率分别为77.84~82.34, 86.04~114.68, 113.80~168.66 μS/m, 土壤有机碳含量分别为0.86~1.74, 1.30~1.52, 7.96~17.36 g/kg, 土壤全氮含量分别为0.18~0.32, 0.24~0.26, 0.44~0.78 g/kg。(3) 仅流动沙地土壤具有粗沙粒成分, 含量占0.50%~0.53%。流动沙地、4年和30年固沙植被区土壤中沙粒含量分别为40.42%~43.82%, 14.36%~17.17%和12.01%~14.75%, 土壤细沙粒含量分别为55.44%~58.84%, 80.15%~83.19%和42.55%~53.30%, 土壤极细沙粒含量分别为0.24%~0.31%, 2.45%~3.33%和15.85%~21.35%。仅30年固沙植被区土壤具有黏粒和粉粒成分, 含量分别为0.84%~1.33%和15.16%~22.75%。(4) 土壤粗沙粒与土壤电导率间呈负相关性($P < 0.05$), 土壤细沙粒、中沙粒均与土壤电导率、有机碳、全氮、碳氮比之间呈显著负相关性($P < 0.01$), 而土壤黏粒、粉粒、极细沙粒均与土壤电导率、有机碳、全氮、碳氮比呈显著正相关性($P < 0.01$)。(5) 土壤分形维数介于0~3。流动沙地、4年和30年固沙植被区土壤分形维数分别为0.55~0.82, 1.57~1.67和2.37~2.59。(6) 土壤分形维数与土壤粗沙粒和中沙粒间呈负相关性($P < 0.05$), 与土壤黏粒、粉粒和极细沙粒间呈显著正相关性($P < 0.01$), 而与土壤细沙粒间无相关性($P > 0.05$)。研究表明, 在腾格里沙漠地区扎设草方格并进行人工造林固沙, 有利于改善土壤质地, 促使土壤理化性质向良好的方向发展, 促进土壤质量提升和实现沙漠化防治。

关键词: 腾格里沙漠; 土壤理化性质; 土壤分形维数; 草方格; 人工植被固沙

中图分类号: S151.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)06-0058-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.06.010

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

CHANG Haitao¹, LIU Rentao¹, LIU Jianan¹, ZHAO Juan¹, LUO Yaxi², ZHANG Jing², MA Ji²

(1. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China, Ministry of
Education, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021)

Abstract: In Shapotou districts of southeast Tengger Desert, we selected the flow sand, 4 and 30 years sand fixing areas within straw checkerboard as the research plots to study the soil properties and fractal characteristics during the process of forestation and sand fixation by straw checkerboard across seasons. The results showed that: (1) Soil moisture content and soil pH were affected by both timing of sand fixation and seasonal variations. (2) Soil electrical conductivity of the flow sand, the 4 year and the 30 years sand fixing vegetation area was 77.84~82.34, 86.04~114.68 and 113.80~168.66 μS/m, respectively, and soil organic carbon of the three kinds of plots was 0.86~1.74, 1.30~1.52 and 7.96~17.36 g/kg, respectively, and soil total nitrogen was 0.18~0.32, 0.24~0.26, and 0.44~0.78 g/kg, respectively. (3) Coarse sand was found only in the flow

收稿日期: 2018-05-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(41661054); 中国科学院“西部之光”项目(XAB2016AW02); 教育部—霍英东教育基金项目(151103); 宁夏留学人员科技活动择优资助项目(宁人社函[2016]494号); 宁夏“生态学”西部一流学科建设项目(NXYLXK2017B06)

第一作者: 常海涛(1994—), 男, 宁夏中宁人, 在读硕士研究生, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: nxcht1994@126.com

通信作者: 刘任涛(1980—), 男, 河南邓州人, 博士、博士后/副研究员, 硕士生导师, 主要从事恢复生态学相关研究与教学工作。E-mail: nxu-liu2012@126.com

sand, and the content was 0.50%~0.53%. Medium sand content of the flow sand, the 4 year and the 30 years sand fixing vegetation area was 40.42%~43.82%, 14.36%~17.17% and 12.01%~14.75%, respectively, and fine sand content was 55.44%~58.84%, 80.15%~83.19% and 42.55%~53.30%, respectively, and very fine sand was 0.24%~0.31%, 2.45%~3.33% and 15.85%~21.35%, respectively. Clay and silt were found in the 30 years sand fixing vegetation area, and the content was 0.84%~1.33% and 15.16%~22.75%, respectively. (4) There was a negative correlation between coarse sand and soil electrical conductivity ($P < 0.05$), and fine sand and medium sand both showed significant negative correlation with electrical conductivity, organic carbon, total nitrogen and carbon-nitrogen ratio ($P < 0.01$). Clay, silt and very fine sand all showed significant positive correlation with soil electrical conductivity, organic carbon, total nitrogen and carbon-nitrogen ratio ($P < 0.01$). (5) The soil fractal dimension was 0~3, soil fractal dimension of the flow sand, the 4 year and the 30 years sand fixing vegetation area was 0.55~0.82, 1.57~1.67 and 2.37~2.59, respectively. (6) There was a negative correlation between soil fractal dimension and coarse sand, medium sand ($P < 0.05$), which had significant positive correlation with clay, silt, and very fine sand ($P < 0.01$), but had no correlation with soil fine sand ($P > 0.05$). It was concluded that the stabilization of flows and by straw checkerboard and artificial forestation and sand fixation in southeast Tengger Desert could improve soil texture, promote the better development of soil physical-chemical properties and the improvement of soil quality, and prevent and control desertification.

Keywords: Tengger Desert; soil physical-chemical properties; soil fractal dimension; straw checkerboard; sand fixation by artificial vegetation

沙漠化是全球性严重的环境问题之一,全球现有沙漠化土地面积约4 560万 km²,并且以每年5~7万 km²的速度增长。中国是受沙漠化危害最严重的国家之一,沙漠化不仅造成生态系统失衡,而且给我国工农业生产和人民生活带来严重影响。综合来看,沙漠化过程受人类活动的影响较大^[1],一方面在人类活动的影响下沙漠化过程加剧,使土壤养分退化的速度与自然条件下的情况相差3~10倍以上^[2];另一方面,各种合理的人工沙漠化防治措施,又可使沙漠化过程发生逆转,促进退化生态系统结构与功能快速恢复^[2]。其中,通过人工植被固沙,结合草方格措施防治沙害,已被国际上公认为沙区生态重建和沙漠化治理最为有效的方法和途径之一^[3]。

研究^[3]表明,人工植物种植和草方格沙障固沙措施能够有效遏制沙漠化的发展,减轻风沙危害和促进局地生境恢复,直接影响土壤的物理性质及养分的输入和输出,进而影响了土壤的养分储量和养分的有效性等肥力状况。李尝君等^[4]研究塔克拉玛干沙漠南缘植被恢复过程中沙土土壤理化性质变化特征,表明植被恢复与土壤理化性质动态关系密切,以植被恢复为前提的沙漠化逆转是土壤细粒化和营养富集的过程;徐丽恒等^[5]通过对腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤理化性质变化特征进行研究,表明沙漠化逆转过程中,土壤理化性质逐步向良性化方向发展,其土壤性状不断提高,结构不断改善,是土壤形成与改良的过程;陈小红等^[6]对宁夏盐池县沙漠化逆转过

程中土壤颗粒分布及养分含量变化进行研究,表明土壤粒级组成逐渐变细,养分逐渐聚集。因此,研究沙漠地区风沙土土壤理化性质及与植被恢复的关系,是了解沙漠地区土壤与植被关系的关键基础,对恢复沙漠植被和防治沙漠化具有重要意义。

土壤由不同颗粒组成、具有不规则形状自相似结构而形成的多孔介质,具有一定的分形特征^[7]。运用土壤粒径分形维数,可以进一步比较不同土壤的颗粒分布特征和质地均匀程度^[8]。分形维数不仅能反映土壤质地、粒径分布和肥力等,还可以模拟和预测土壤水分特征的综合性指标,近年来被广泛应用^[7]。高玉寒等^[9]对内蒙古不同土地利用类型的土壤颗粒分布及分形维数特征进行了研究;刘云鹏等^[10]对陕西不同类型的土壤颗粒分布特征进行了研究;王德等^[11]通过对黄土高原不同土地利用类型的土壤颗粒分布特征进行研究。综合分析表明,不同土地利用类型下,土壤粒径分形特征差异明显,并且土壤粒径质地越粗分形维数越小,质地越细分形维数越大^[7]。但是,关于腾格里沙漠东南缘草方格人工植被固沙过程中土壤理化性质演变及其分形维数特征报道较少。鉴于此,以腾格里沙漠东南缘沙坡头区的草方格人工固沙植被区作为研究对象,分别选取了流动沙地、4年和30年固沙植被区作为研究样地,测定不同时间草方格人工固沙植被区土壤理化性质和土壤颗粒分布特征,运用分形模型计算了土壤颗粒分布的分形维数,阐明草方格人工固沙植被区土壤理化性质变化规

律及其分形维数特征,旨在为干旱风沙区人工固沙林建设、土壤管理、防沙治沙提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区中卫市沙坡头地区腾格里沙漠东南缘($37^{\circ}32'N, 105^{\circ}02'E$),海拔约1 300 m,处在阿拉善高原荒漠与荒漠草原过渡地带,为典型的草原化荒漠地带。该地区年平均气温 $10.4^{\circ}C$,最低气温 $-24.5^{\circ}C$,最高气温 $38.1^{\circ}C$,冬夏昼夜温差大;全年日照时间3 264 h。年均降水量186 mm,降水年际变化大,且分布不均匀,降水主要集中于6—8月,占全年降水量的60%;年潜在蒸发量3 000 mm。年均风速2.9 m/s,年均沙尘天数达到59 d。土壤以细粒沙为主,以风沙土及灰棕荒漠土分布最广。

沙坡头地区植被固沙体系始建于1956年,并于1964年、1973年、1982年和1992年进行扩建,形成了沿铁路两侧长16 km,宽1 000 m的植物固沙防护带。在世界银行贷款项目“宁夏黄河东岸防沙治沙项目”的资助下,于2013年开始了新一轮草方格人工植被固沙工程建设。人工固沙造林规格为:在 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的麦草方格中,按照行距3 m、株距1 m种植模式,在无灌溉条件下栽植柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、小叶锦鸡儿(*Caragana amicrophylla* Lam.)、沙拐枣(*Calligonum arborescens* Litv.)和沙木蓼(*Atraphaxis bracteata* A. Los.)等旱生灌木。在植被恢复区主要草本植被包括冰草(*Agropyron cristatum* Gaertn.)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum* Moq.)等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 于2017年5月在腾格里沙漠东南缘选取流动沙地、4年(2013年)和30年(1987年)固沙植被区作为研究样地。每种类型样地各有5个重复样区,面积为 750 m^2 ($30\text{ m} \times 25\text{ m}$),间距 $2\sim 3\text{ km}$ 。共15个样区。每个调查样区内利用5点取样法采取混合土样,取样深度为0—10 cm。分别在春季(5月)、夏季(7月)和秋季(10月)进行取样。共取土样45个。

1.2.2 土壤样品处理与测定 取混合土样中的 $1/4$ 测定土壤含水量。将剩下的 $3/4$ 土壤样品经过2 mm土壤筛,除去其中的杂质,如草根和叶片等。然后,放置在实验室空场处,在自然状态下风干土壤样品,用来测定土壤pH、电导率、土壤有机碳和全氮含量以及土壤粒径组成。

土壤含水量(%)采用烘干法测定,即将盛有新鲜土样的铝盒放在分析天平上称重,准确至0.01 g,然

后置于 $105^{\circ}C$ 烘箱中烘烤12 h后,冷却至室温立即称重;土壤pH和电导率($\mu\text{S}/\text{m}$)均采用1:5土水比浸提后,分别使用玻璃电极法及便携式电导率仪进行测定;土壤有机碳(g/kg)和全氮(g/kg)通过元素分析仪来测定其百分含量;土壤粒径组成采用Mastersizer 3000激光衍射粒度分析仪进行测定。根据美国农业部(USAD)制土壤质地分级标准划分土壤质地:极粗沙粒($1\ 000\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$)、粗沙粒($500\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$)、中沙粒($250\sim 500\ \mu\text{m}$)、细沙粒($100\sim 250\ \mu\text{m}$)、极细沙粒($50\sim 100\ \mu\text{m}$)、粉粒($2\sim 50\ \mu\text{m}$)和黏粒($<2\ \mu\text{m}$)^[7]。

土壤颗粒分布遵循自相似原理,在二维平面中,由大于某一粒径 R_i ($R_i > R_{i+1}$, $i=1, 2, 3, \dots, i$)的土粒构成的体积 $V(r > R_i)$ 可表示为:

$$V(r > R_i) = C_v \left[1 - \left(\frac{R_i}{\lambda_v} \right)^{3-D} \right] \quad (1)$$

式中: R_i 为特征尺度; C_v 、 λ_v 为描述颗粒形状、尺度的常数。

当 $R_i=0$ 时,(1)式变为计算全部土壤颗粒总体积 V_T ,即 $V(r > R_i) = V_T = C_v$

当 $R_i=R_{\max}$ (R_{\max} 为最大粒径)时, $\lambda_v=R_{\max}$ 。

因此有:

$$\frac{V(r > R_i)}{V_r} = 1 - \left[\frac{R_i}{R_{\max}} \right]^{3-D} \quad (2)$$

调整(2)式可得:

$$\frac{V(r < R_i)}{V_r} = \left[\frac{R_i}{R_{\max}} \right]^{3-D} \quad (3)$$

对(3)式两边同时取对数,即可得土壤颗粒组成的分形维数计算公式:

$$\lg \left(\frac{V(r < R_i)}{V_r} \right) = (3-D) \lg \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right) \quad (4)$$

对于某一土壤各级粒径的土壤含量进行整理,并以 $\lg \left(\frac{V(r < R_i)}{V_r} \right)$ 为纵坐标, $\lg \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)$ 为横坐标作图,得到直线的斜率为 $3-D$,即可得到土壤分形维数 D 。本研究中土壤最大粒径为 $500\ \mu\text{m}$ 。

1.3 数据处理与分析

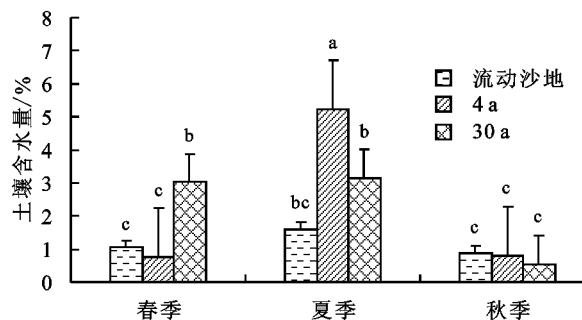
所有数据采用SPSS软件进行统计分析。采用单因素方差分析(One-way Anova)和多重比较法分析不同数据组间的差异,采用Spearman相关系数分析不同指标间的相关性。显著水平为 $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同人工固沙植被区土壤理化性质

2.1.1 土壤含水量 由图1可知,土壤含水量既受不同固沙年限的影响,亦受季节变化的调控。春季,土壤含水量表现为30年固沙植被区显著高于4年固沙植被区和对照流动沙地($P < 0.05$),而后二者之间无显著性差异。夏季,土壤含水量表现为4年固沙

植被区显著高于30年固沙植被区和对照流动沙地($P<0.05$),而后二者之间无显著性差异。秋季,土壤含水量表现为3个样地间无显著差异性($P>0.05$)。随着季节变化,不同类型样地土壤含水量季节分布特征也具有一定的差异性,流动沙地土壤含水量表现为3个季节间均无显著性差异($P>0.05$),但4年固沙植被区土壤含水量表现为夏季显著高于春季和秋季($P<0.05$),30年固沙植被区土壤含水量表现为春季和夏季显著高于秋季($P<0.05$)。



注:图中不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图1 随季节变化不同样地土壤含水量分布

2.1.2 土壤pH和电导率 由图2(a)可知,该研究地区土壤表现为弱碱性。春季,土壤pH表现为3个样地之间无显著性差异($P>0.05$)。但到了夏季,土

壤pH表现为4年固沙植被区显著高于流动沙地($P<0.05$),而两者与30年固沙植被区间均无显著性差异($P>0.05$)。秋季,土壤pH又表现为4年固沙植被区显著高于30年固沙植被区($P<0.05$),而两者与流动沙地间均无显著性差异($P>0.05$)。3种类型样地土壤的pH均呈现出相似的季节分布特征,流动沙地、4年和30年固沙植被区土壤pH均表现为春季显著小于夏季和秋季($P<0.05$),而夏季与秋季之间均无显著性差异($P>0.05$)。

从图2(b)可以看出,随着季节变化,土壤电导率均受固沙年限的显著影响。春季和夏季,土壤电导率均表现为从流动沙地到4年固沙植被区和30年固沙植被区显著增加($P<0.05$)。秋季,土壤电导率表现为30年固沙植被区显著高于流动沙地和4年固沙植被区($P<0.05$),而后二者之间无显著性差异($P>0.05$)。随着季节变化,不同类型样地土壤电导率季节分布特征也具有一定的差异性。流动沙地土壤电导率表现为3个季节间无显著性差异($P>0.05$),但4年固沙植被区土壤电导率表现为春季显著高于夏季和秋季($P<0.05$),30年固沙植被区土壤电导率表现为随着季节更替而显著降低($P<0.05$)。

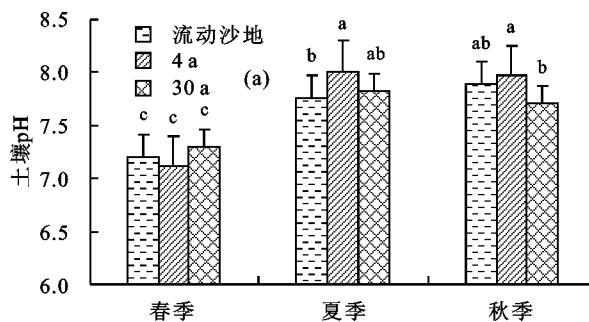
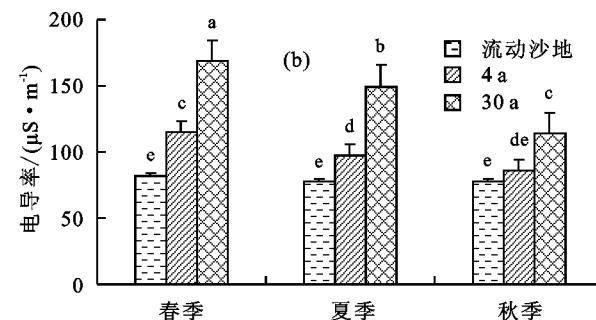


图2 随季节变化不同样地土壤pH和电导率

2.1.3 土壤有机碳和全氮 从图3可以看出,土壤有机碳和全氮以及土壤碳氮比值受固沙年限的影响较为显著,而受季节的影响较小。3个季节土壤有机碳和全氮含量均表现为30年固沙植被区显著高于4年固沙植被区和流动沙地($P<0.05$),而后两者之间无显著性差异($P>0.05$)。

随着季节变化,不同类型样地土壤有机碳和全氮季节分布特征也具有一定的差异性。流动沙地和4年固沙植被区土壤有机碳、全氮和碳氮比在3个季节间均无显著性差异($P>0.05$)。但是,30年固沙植被区土壤有机碳、全氮和碳氮比均表现为夏季显著高于春季和秋季($P<0.05$),而后两个季节间无显著性差异。

2.1.4 土壤粒径分布 由表1可知,在腾格里沙漠东南缘沙坡头固沙植被区内,土壤颗粒以细沙粒与中沙粒为主要类型。其中,流动沙地、4年和30年固沙植被区的土壤细沙粒与中沙粒总含量分别达到了



98%, 96% and 55%。

从表1可以看出,通过对不同粒径分析发现,不同样地的粒径含量随固沙时间的变化而变化,但不受季节变化的影响。粗沙粒表现为流动沙地含量显著,而4年和30年固沙植被区样地土壤则无分布。中沙粒则表现为流动沙地含量显著高于4年和30年固沙植被区($P<0.05$),而后两者之间则无显著性差异。细沙粒表现为4年固沙植被区含量显著高于30年固沙植被区和流动沙地($P<0.05$),而后两者之间则无显著性差异。极细沙粒表现为30年固沙植被区含量显著高于4年固沙植被区和流动沙地($P<0.05$),而后两者之间则无显著性差异。黏粒和粉粒表现为30年固沙植被区含量显著,而4年固沙植被区和流动沙地土壤则无分布。

2.2 不同人工固沙植被区土壤分形维数

由表2可知,腾格里沙漠人工固沙植被区土壤分

形维数介于 0~3。流动沙地、4 年和 30 年固沙植被区的土壤分形维数分别为 0.55~0.82, 1.57~1.67, 2.37~2.59。通过对各类型样地分形维数分析可以看出, 土壤分形维数随固沙年限的延长而增大, 但不受季节变化的影响。在 3 个季节间, 土壤分形维数表现为流动沙地、4 年和 30 年固沙植被区间均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.3 不同人工固沙植被区土壤理化性质、土壤颗粒分布和土壤分形维数间的相关性

由表 3 可知, 土壤粗沙粒与土壤电导率间呈负相关性 ($P < 0.05$), 而与土壤水分、土壤 pH、有机碳、全氮和碳氮比各指标间均无相关性 ($P > 0.05$)。土壤细沙粒、中沙粒与土壤电导率、有机碳、全氮、碳氮比间均呈极显著负相关性 ($P < 0.01$), 而与土壤水分和土壤 pH 间亦均无相关性 ($P > 0.05$)。土壤黏粒、粉粒、极细沙粒与土壤电导率、有机碳、全氮、碳氮比间均呈显著正相关性 ($P < 0.01$), 而与土壤水分和土壤 pH 间均无相关性 ($P > 0.05$)。

从图 4 可以看出, 草方格人工固沙植被区土壤颗粒分布分形维数与各粒级土壤颗粒含量间的相关性差异显著。土壤分形维数与土壤粗沙粒、中沙粒、粉粒和黏粒之间均存在线性相关关系 ($P < 0.05$), 而与极细沙粒之间存在对数相关关系 ($P < 0.01$)。其中, 土壤分形维数与土壤粗沙粒含量呈负相关 ($R^2 = 0.197, N = 9, P < 0.05$)。土壤分形维数与土壤中沙粒含量呈显著负相关 ($R^2 = 0.669, N = 39, P < 0.01$)。土壤分形维数与土壤黏粒、粉粒和极细沙粒含量呈显著正相关 (R^2 (黏粒) = 0.980, $N = 14, P <$

0.01; R^2 (粉粒) = 0.835, $N = 14, P < 0.01$; R^2 (极细沙粒) = 0.993, $N = 39, P < 0.01$)。但是, 土壤分形维数与土壤细沙粒未表现出相关性 ($P > 0.05$)。

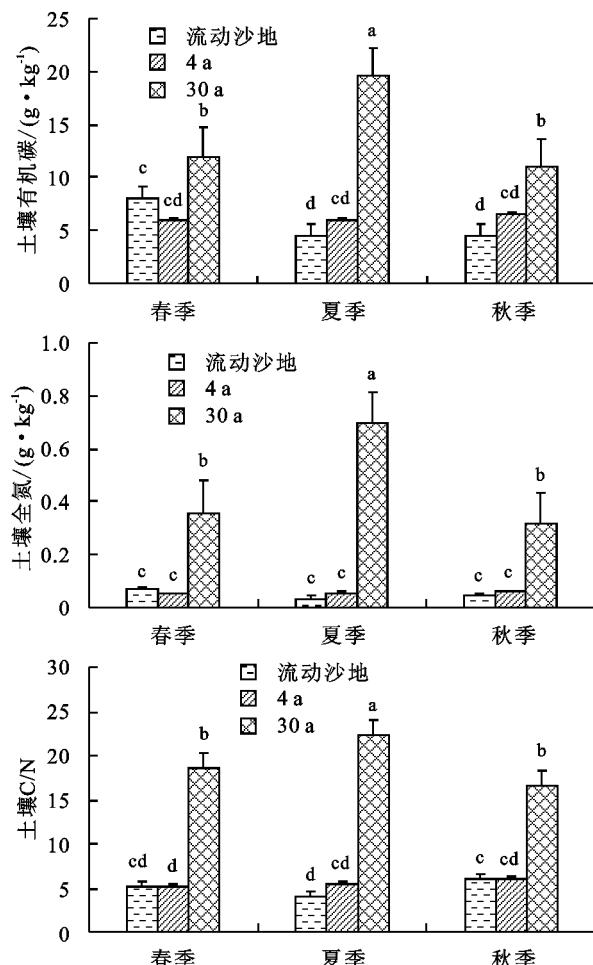


图 3 随季节变化不同样地土壤有机碳和全氮含量及其 C/N 分布

表 1 随季节变化不同样地土壤粒径分布

单位: %

时间	样地	黏粒	粉粒	极细沙粒	细沙粒	中沙粒	粗沙粒
春季	流动沙地	0	0	0.24±0.05b	58.84±2.42b	40.42±2.09a	0.51±0.37a
	4 年	0	0	3.33±0.61b	82.15±1.19a	14.52±1.19b	0
	30 年	1.24±0.08a	22.74±1.17a	21.35±1.39a	42.66±1.07b	12.01±1.75b	0
夏季	流动沙地	0	0	0.31±0.22b	57.08±0.94b	42.08±0.41a	0.53±0.46a
	4 年	0	0	2.68±0.57b	80.15±1.44a	17.17±1.86b	0
	30 年	1.33±0.06a	22.75±0.57a	20.85±0.69a	42.55±0.48b	12.50±0.81b	0
秋季	流动沙地	0	0	0.25±0.13b	55.44±4.81b	43.82±4.90a	0.50±0.23a
	4 年	0	0	2.45±0.28b	83.19±0.98a	14.36±1.14b	0
	30 年	0.84±0.21a	15.16±3.85a	15.85±3.86a	53.30±7.98b	14.75±2.61b	0

注: 表中数据为平均值±标准差; 同列不同字母表示各处理的差异显著 ($P < 0.05$)。

表 2 随季节变化不同样地的土壤分形维数

样地	春季	夏季	秋季
流动沙地	0.63±0.08c	0.55±0.27c	0.82±0.08c
4 年	1.67±0.08b	1.57±0.10b	1.58±0.05b
30 年	2.59±0.01a	2.61±0.01a	2.37±0.21a

注: 表中数据为平均值±标准差; 同列不同字母表示各处理的差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

降水是干旱风沙区土壤水分来源的主要途径之一, 其季节变化在一定程度使得沙层土壤水分也表现出季节变化特征^[12]。本研究中, 土壤含水量既受到不同固沙年限的影响, 亦受到季节变化的调控, 说明不同固沙年限样地土壤含水量在年内季节变化是气

候与植被共同作用所导致的结果^[13]。研究^[14]表明,固沙植被在一定程度上能够起到降低风速的作用。春季,本研究区域风力较大,4年固沙人工植被区植被覆盖度较低,不能起到保护地表的作用,易导致地表土壤水分损失。随着固沙时间延长和植被恢复固定流沙表层,土壤结皮开始形成^[15],可以起到保持水分的作用进而减少水分损失,结果30年人工固沙植被区土壤含水量显著高于4年和流动沙地。夏季,土壤含水量则表现为4年人工固沙植被区显著高于30年人工固沙植被区和流动沙地。在腾格里沙漠东南

缘沙坡头地区,夏季降水占全年降雨量的60%,处于降水入渗补给阶段,增加了土壤表层的含水量,4年人工固沙植被区土壤含水量较高。但是,30年人工固沙植被区土壤含水量较低,一方面是由于植被截留和地表结皮使得结皮下土壤得到的补充水分相对较少^[16];另一方面是在生长季植物根系对水分的高效吸收利用的结果。到了秋季,由于降雨偏少,土壤含水量较低,使得不同类型样地土壤含水量均处于一种较低的水平,导致不同类型样地间土壤含水量无显著性差异。

表3 随季节变化不同样地土壤理化性质与土壤颗粒分布的相关性

土壤性质指标	黏粒	粉粒	极细沙粒	细沙粒	中沙粒	粗沙粒
土壤含水量	0.219	0.219	0.226	-0.035	-0.260	-0.116
pH	-0.001	-0.035	-0.040	0.047	-0.003	-0.032
电导率	0.861**	0.869**	0.883**	-0.451**	-0.669**	-0.334*
有机碳	0.933**	0.923**	0.899**	-0.655**	-0.489**	-0.219
全氮	0.873**	0.860**	0.840**	-0.587**	-0.483**	-0.224
碳氮比	0.973**	0.973**	0.960**	-0.685**	-0.529**	-0.235

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

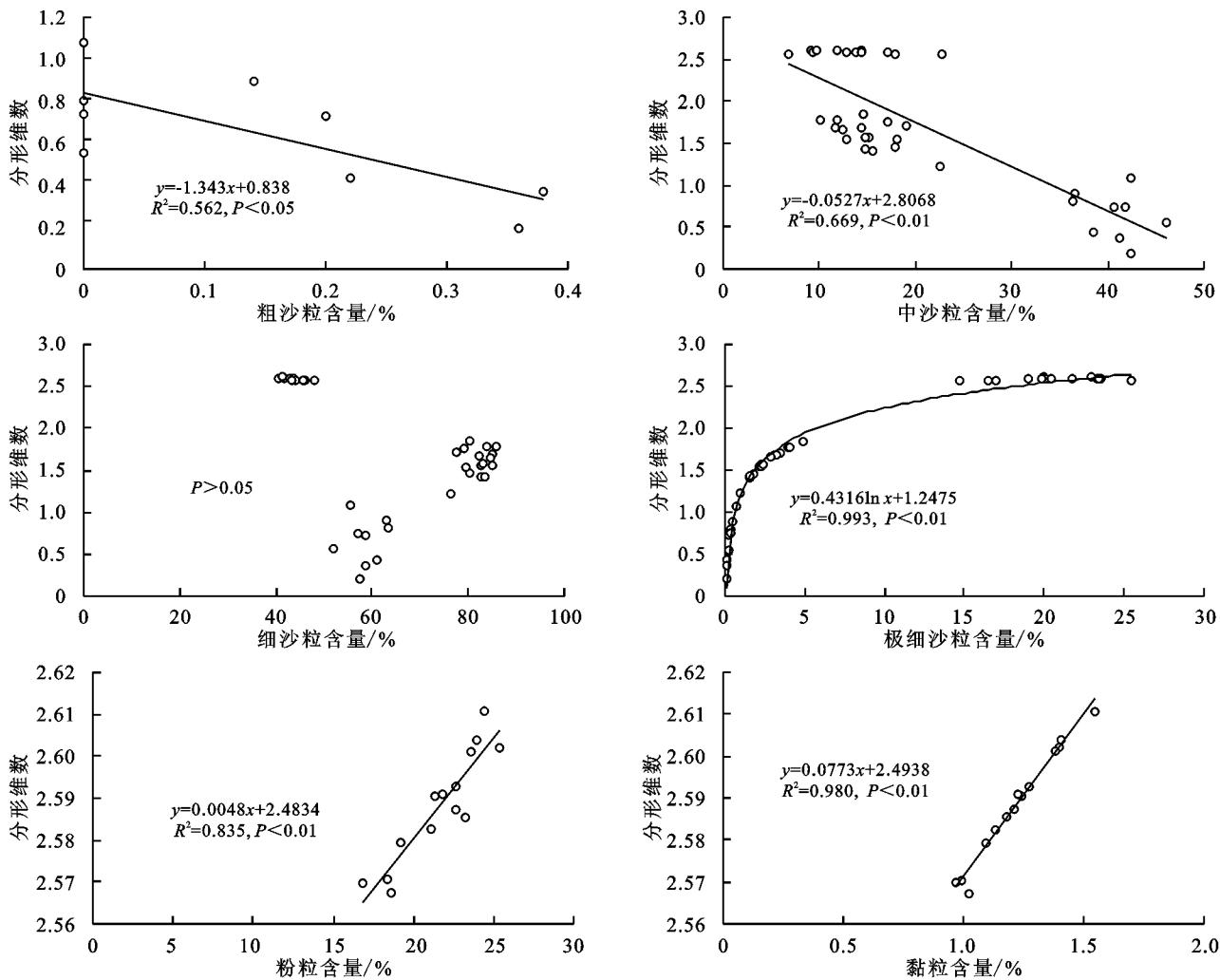


图4 随季节变化土壤颗粒分布分形维数与各粒级含量的关系

土壤酸碱度是土壤基本属性的重要指标之一。刘任涛等^[17]在宁夏盐池县境内东北部区域研究表

明,沙漠化逆转过程中不同固沙年限表层土壤 pH 呈现出逐步减小的趋势。而本研究中不同固沙年限样

地间土壤 pH 未呈现出显著变化。存在差异的原因可能是腾格里沙漠恶劣的土壤条件,导致 30 年的人工固沙措施对土壤酸碱度影响较小。土壤溶液电导率反映在一定水分条件下土壤盐分的实际状况,并且包含了水分含量、土壤盐分及离子组成等信息,且该参数具有简便、快捷、可比性强等特点^[18]。本研究结果显示,人工固沙植被区土壤电导率随着固沙年限的变化而呈现出较为明显的波动性,且远大于流动沙地,这与刘任涛等^[17]的研究结果相吻合。在固沙植被恢复过程中,气候与植被相互耦合导致土壤盐分的分布发生改变,随着固沙植被生长,植物根系泌盐作用增强,可能是导致 30 年人工固沙植被区土壤电导率偏高的重要原因。但随着季节的变化,4 年和 30 年固沙植被区土壤电导率呈降低的趋势,这可能是由于春季降雨量较少,蒸发垂直向上,致使盐分在土壤表层积累,而到了夏季与秋季,随着降雨量增加,土壤盐分随水分下渗,使电导率降低^[19]。

土壤有机碳、全氮是土壤肥力的重要指标,主要来源于植物地上和地下枯落物的分解,很大程度上受植被、气候、人为活动等的影响^[20]。本研究中,随着固沙时间的延长,土壤有机碳、全氮含量、C/N 均呈现为 30 年 > 4 年 > 流动沙地的特征,这与贾晓红等^[21]对腾格里沙漠东南缘沙坡头地区关于流动沙地土壤有机质和全氮的研究结果相一致。这说明在沙区进行人工林种植固沙可以恢复地表植被,促进土壤理化性质改善,形成土壤结皮等过程来改变土壤的养分特征,使其向着良好的方向演化^[16]。人工植被固沙过程致使原本以流动沙地为主的沙漠景观成为了一个复杂的荒漠生态系统,降尘、降水等输送的物质对土壤质地变化产生重要影响,结束了流沙环境下土壤养分的流失过程,形成了新的物质和能量流动转换体系^[20]。同时,由于枯落物和有机残体的积累,微生物的繁殖和生化活性的增强,加速了土壤中物质的转化,从而改善了土壤营养条件,导致土壤有机碳、全氮在表层积累^[21]。随着固沙年限的延长,土壤团聚体稳定,具有较强的固碳能力,并随着植被的恢复,土壤微生物种群和数量发生变化,导致土壤发生矿化作用,使有机碳和全氮含量呈增加的趋势,这与 Guo 等^[22]的研究结果一致。

土壤粒径分布是各种因素共同作用的结果^[23]。本研究流动沙地与 4 年固沙植被区相比较,土壤中的中沙粒明显减少而细沙粒明显增加;4 年与 30 年固沙植被区相比较则是细沙粒明显减少,而极细沙粒明显增多,这说明随着固沙年限的延长,植被恢复程度

增加,土壤表层风蚀作用减弱,风积作用加强^[24],导致土壤颗粒出现明显的、渐变的而非跳跃式的细化过程。同时,也说明土壤颗粒组成的不同是造成土壤养分差异的最主要的内在原因^[25]。通过分析研究发现,随着固沙年限的变化,土壤粗沙粒与土壤电导率间呈负相关性,与土壤水分、土壤 pH、有机碳、全氮和碳氮比各指标间均无相关性。土壤细沙粒、中沙粒与土壤电导率、有机碳、全氮、碳氮比呈显著负相关,而与土壤水分和土壤 pH 间亦均无显著相关性。土壤黏粒、粉粒、极细沙粒与土壤电导率、有机碳、全氮、碳氮比呈显著正相关。但已有研究^[26]结果显示,土壤含水量与细沙粒呈显著正相关,与粗沙粒呈显著负相关,这可能与宁夏沙坡头地区气候及降雨条件的影响及流动沙地对浅层土壤的影响有关。

土壤粒径是土壤重要的物理性质之一^[27]。魏茂宏等^[28]对江河源区高寒退化草甸的土壤粒径研究发现,分维值为 2.81 是土壤发生侵蚀的阈值;桂东伟等^[29]对塔里木盆地绿洲农田的土壤粒径研究发现,分形维数为 2.11,是区别土壤颗粒分布特征好与差的临界值。在本研究中,土壤分形维数随固沙年限的延长而增大,说明随着人工固沙植被区土壤植被的恢复,表层土壤中较高的有机质、氮浓度和植被根系生物学活动的发生均会导致分形维数增大^[30-31]。这与土壤颗粒组成的变化规律相似,说明分形维数可以很好地表征土壤颗粒组成。进一步进行相关性分析发现,土壤颗粒分布分形维数对各粒级土壤颗粒含量反映程度不同^[32],其中土壤分形维数与粗沙粒含量呈负相关,与中沙粒含量呈显著负相关,与黏粒和粉粒含量呈显著正相关,说明随着固沙年限的增加,土壤黏粒与粉粒含量呈显著增加的趋势,而土壤粗沙粒和中沙粒含量呈显著降低的趋势,这与 Gao 等^[33]对土壤分形维数与土壤粒径分布之间的相关性的结论相似。土壤分形维数与极细沙粒含量之间存在对数关系,说明在人工植被固沙区,植被建立 4 年内,土壤极细沙粒含量显著增加,质地发生明显改变,但随着固沙时间的延长,极细沙粒含量逐渐趋于平衡状态。土壤分形维数与土壤细沙粒未表现出相关性,说明土壤分形维数并不是对每个粒级的变化都反映明显^[34]。分析表明,土壤黏粒和粉粒含量越多其分形维数越大,土壤粗沙粒和中沙粒含量越多则分形维数越小。说明土壤颗粒分布的极细与极粗颗粒含量决定土壤颗粒组成的分形维数。

4 结 论

(1) 在腾格里沙漠进行植被固沙工程,对土壤理化

性质产生了一定的影响。固沙年限变化对土壤含水量和土壤pH影响较小,而受季节变化的调控作用较为明显。随固沙年限的延长,土壤电导率、土壤有机碳、全氮含量均呈现增加趋势,但受季节变化的影响较小。

(2)在草方格人工固沙植被区,随着固沙年限的延长,土壤粗沙粒、中沙粒含量呈现降低趋势,细沙粒含量表现为先增高后降低趋势,而黏粒、粉粒和极细沙粒均呈现增加趋势。

(3)在草方格人工固沙植被区,土壤粒径分布对土壤理化性质影响较大。并且土壤质地越细,分形维数大,而质地越粗,分形维数则越小。

综合分析表明,在腾格里沙漠地区扎设草方格并进行人工造林固沙,有利于改善土壤质地,促使土壤理化性质向良好的方向发展,促进土壤质量提升和实现沙漠化防治。

参考文献:

- [1] Li J C, Liu H X, Su Z Z, et al. Changes in wind activity from 1957 to 2011 and their possible influence on aeolian desertification in northern China[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(6): 1-10.
- [2] 王涛,吴薇,赵哈林,等.科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析[J].中国沙漠,2004,24(5):519-528.
- [3] Houérou H N. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid Mediterranean ecosystems in north Africa and west Asia: A review[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2000, 14(1): 3-14.
- [4] 李尝君,曾凡江,郭京衡,等.植被恢复程度与沙地土壤性质:以塔克拉玛干沙漠南缘为例[J].干旱区研究,2015,32(6):1061-1067.
- [5] 徐丽恒,王继和,李毅,等.腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征[J].中国沙漠,2008,28(4):690-695.
- [6] 陈小红,段争虎,谭明亮,等.沙漠化逆转过程中土壤颗粒分布及其养分含量的变化特征:以宁夏盐池县为例[J].土壤通报,2010,41(6):1412-1417.
- [7] Su Y Z, Zhao H L, Zhao W Z, et al. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification[J]. Geoderma, 2004, 122(1): 43-49.
- [8] Tyler S W, Wheat-craft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 987-996.
- [9] 高玉寒,姚云峰,李龙,等.赤峰市敖汉旗4种类型土壤机械组成及分形维数的垂直分布特征[J].江苏农业科学,2017,45(11):236-239.
- [10] 刘云鹏,王国栋,张社奇,等.陕西4种土壤粒径分布的分形特征研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(2):92-94.
- [11] 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):3081-3089.
- [12] 杨晓玉,邵天杰,赵景波.腾格里沙漠沙坡头地区旱季沙层含水量[J].水土保持通报,2016,36(2):88-92.
- [13] 李新荣,张志山,谭会娟,等.我国北方风沙危害区生态重建与恢复:腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨[J].中国科学(生命科学),2014,44(3):257-266.
- [14] 程皓,李霞,侯平,等.塔里木河下游不同覆盖度灌木防风固沙功能野外观测研究[J].中国沙漠,2007,27(6):1022-1026.
- [15] 蒋德明,曹成有,押田敏雄,等.科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工林防风固沙及改良土壤效应研究[J].干旱区研究,2008,25(5):653-658.
- [16] 罗维成,赵文智,孙程鹏,等.科尔沁沙地樟子松(*Pinus sylvestris*)人工固沙林演变过程中物种多样性和土壤水分特征[J].中国沙漠,2018,38(1):126-132.
- [17] 刘任涛,杨新国,宋乃平,等.荒漠草原区固沙人工柠条林生长过程中土壤性质演变规律[J].水土保持学报,2012,26(4):108-112.
- [18] 孙宇瑞.土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J].中国农业大学学报,2000,5(4):39-41.
- [19] 韩跃,马风云,解国磊,等.黄河三角洲盐碱地混交林土壤电导率的空间异质性[J].中国水土保持科学,2014,12(5):84-89.
- [20] 周正虎,王传宽,张全智.土地利用变化对东北温带幼龄林土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响[J].生态学报,2015,35(20):6694-6702.
- [21] 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.
- [22] Guo Y, Zhao H, Zuo X, et al. Biological soil crust development and its topsoil properties in the process of dune stabilization, Inner Mongolia, China[J]. Environmental Geology, 2008, 54(3): 653-662.
- [23] 张俊华,李国栋,南忠仁,等.黑河绿洲区耕作影响下的土壤粒径分布及其与有机碳的关系[J].地理研究,2012,31(4):608-618.
- [24] 赵存玉.半干旱沙质草原沙漠化过程中植被变化及其与生境的关系[D].兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2006.
- [25] 柳云龙,吕军,王人潮.低丘红壤作物易旱与土壤持水供水特性的关系[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2002,28(1):42-46.
- [26] 仓木拉,木兰,王晓栋,等.西藏锦鸡儿群落表层土壤粒径空间分布特征及其与土壤水分相关性分析[J].家畜生态学报,2014,35(9):23-27.

- and plant growth in Lathkill Dale NNR. I. A twelve-year summary of solar radiation and temperature[J]. *Plant Cell and Environment*, 1986, 9(1): 49-56.
- [27] Nichols J D. Relation of organic carbon to soil properties and climate in the Southern Great Plains[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(6): 1382-1384.
- [28] 陶贞, 次旦朗杰, 张胜华, 等. 草原土壤有机碳含量的控制因素[J]. *生态学报*, 2013, 33(9): 2684-2694.
- [29] Liu L, Duan Z H, Xu M K, et al. Effect of monospecific and mixed Cunninghamia lanceolata plantations on microbial community and two functional genes involved in nitrogen cycling[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 413-428.
- [30] Florinsky I V, McMahon S, Burton D L. Topographic control of soil microbial activity: A case study of denitrifiers[J]. *Geoderma*, 2004, 119(1): 33-53.
- [31] Berendsen R L, Pieterse C M, Bakker P A. The rhizosphere microbiome and plant health[J]. *Trends in Plant Science*, 2012, 17(8): 478-486.
- [32] Wu G, Liu Y, Tian F, et al. Legumes functional group promotes soil organic carbon and nitrogen storage by increasing plant diversity[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(4): 1336-1344.
- [33] 刘学彤, 魏艳春, 杨宪龙, 等. 水蚀风蚀交错带不同退耕模式对土壤有机碳及全氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 91-98.
- [34] Zhao J, Wang X, Wang X, et al. Legume-soil interactions: Legume addition enhances the complexity of the soil food web[J]. *Plant and Soil*, 2014, 385(1/2): 273-286.
- [35] 王郡军, 曹子林, 李小英, 等. 滇池湖滨带不同植被类型土壤碳、氮时空分布特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(5): 55-59.
- [36] 何亚龙. 黄土高原退耕地土壤水分养分与碳密度的研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2011.
- [37] 温仲明, 焦峰, 刘宝元, 等. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2025-2029.
- [38] 李裕元, 邵明安, 郑纪勇, 等. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(6): 2279-2287.
- [39] 方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. *中国科学(生命科学)*, 2010, 40(7): 566-576.
- [40] 邓蕾. 黄土高原生态系统碳固持对植被恢复的响应机制[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2014.

(上接第 57 页)

- [21] 何晓玲, 郑子成, 李廷轩. 不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(12): 2492-2500.
- [22] 金轲, 蔡典雄, 吕军杰, 等. 耕作对坡耕地水土流失和冬小麦产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 1-5.
- [23] 白永会, 查轩, 查瑞波, 等. 稜秆覆盖红壤径流养分流失效益及径流剪切力影响研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 94-99.

- [24] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 稜秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 85-88.
- [25] 杨青森, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 稜秆覆盖对东北黑土区土壤侵蚀及养分流失的影响[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(2): 1-5.
- [26] 严坤, 王玉宽, 徐佩, 等. 稜秆覆盖对三峡库区坡面侵蚀的影响[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 6-10.

(上接第 65 页)

- [27] Peng H, Horton R, Lei T, et al. A modified method for estimating fine and coarse fractal dimensions of soil particle size distributions based on laser diffraction analysis[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(4): 937-948.
- [28] 魏茂宏, 林慧龙. 江河源区高寒草甸退化序列土壤颗粒分布及其分形维数[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 679-686.
- [29] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 等. 塔里木盆地南缘绿洲农田土壤颗粒分布分形特征及影响因素研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 730-735.
- [30] Yu J, Lv X, Bin M, et al. Fractal features of soil particle size distribution in newly formed wetlands in the Yellow River Delta[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: e10540.

- [31] Bai E, Boutton T W, Liu F, et al. Spatial variation of soil $\delta^{13}\text{C}$ and its relation to carbon input and soil texture in a subtropical lowland woodland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 44(1): 102-112.
- [32] 姜坤, 秦海龙, 卢瑛, 等. 广东省不同母质发育土壤颗粒分布的分形维数特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 319-324.
- [33] Gao G L, Ding G D, Zhao Y Y, et al. Characterization of soil particle size distribution with a fractal model in the desertified regions of northern China[J]. *Acta Geophysica*, 2016, 64(1): 1-14.
- [34] 刘阳, 陈波, 杨新兵, 等. 冀北山地典型森林土壤颗粒分形特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 159-163.