

荒漠-绿洲边缘区生态过渡带的土壤颗粒分形特征^①

陈小红¹, 段争虎¹, 何洪泽²

(1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 2 甘肃农业大学资源环境学院, 兰州 730070)

摘要: 通过实地采样和实验室分析, 测定了黑河中游荒漠绿洲边缘区生态过渡带的土壤粒级分布、有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、速效氮 (AN) 和速效磷 (AP) 的含量, 并采用 1993 年杨培岭等提出的用粒径的重量分布代替数量分布的土壤分形模型, 计算了土壤颗粒分形维数; 最后利用统计分析法, 研究了颗粒分形维数与土壤粒级分布及各养分指标的关系。结果表明: 从荒漠边缘向绿洲延伸的过渡带, 土壤中砂粒含量占绝对优势, 粉粒居中, 黏粒最少, 采样区土壤质地较粗; 土壤颗粒分形维数在 2.105~2.609 之间变动, 处于极低水平, 与土壤各养分指标具有相似的变化趋势, 除靠近绿洲区存在一个“生态裂谷”外, 整体呈上升趋势; 利用相关分析法得出, 土壤颗粒分形维数与砂粒含量呈显著负相关, 与黏粉粒及各养分指标均呈显著的正相关; 利用回归分析法进行定量分析, 砂粒含量每增加 1 g/kg, 颗粒分形维数 D 降低 0.0019 个单位; 粉粒和黏粒含量每增加 1 g/kg, 颗粒分形维数 D 分别增加 0.002 和 0.023 个单位, 对土壤颗粒分形维数变化幅度的影响依次为黏粒>粉粒>砂粒, 分形维数对黏粒含量的变化最为敏感。因此, 可以将土壤颗粒分形维数作为衡量荒漠-绿洲边缘区土壤养分变化状况的指标之一, 用于反映荒漠绿洲区土壤的退化状况。

关键词: 荒漠-绿洲; 生态过渡带; 土壤颗粒分形维数

中图分类号: S152.3; P941.73

荒漠-绿洲边缘区是在不同时空尺度上由绿洲与荒漠间的物流、能流和信息流产生不连续分布形成的具有临界阈特征的界面以及围绕该界面向外延伸的空间域, 是绿洲化 (开荒) 过程和荒漠化 (土壤退化) 过程最活跃的地区^[1]。绿洲具有向荒漠扩展的可能, 荒漠时刻都在侵袭着绿洲。荒漠绿洲边缘区的生态过渡带就是荒漠生态系统和绿洲生态系统之间的接触带^[2]。生态过渡带是绿洲生态系统的重要组成部分, 对维持绿洲的稳定具有重要作用。目前对荒漠绿洲过渡带的研究已非常多, 主要集中在甘肃河西地区的荒漠绿洲和新疆地区的荒漠绿洲。张勃等^[3]研究了张掖荒漠绿洲过渡带的土壤水盐异质性及生态环境效应; 王惠等^[2]研究了黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异; 贾宝全等^[4]研究了民勤荒漠绿洲过渡带的环境特征; 何志斌等^[5]研究了过渡带人工梭梭林土壤水分的空间异质性及典型荒漠植被的空间异质性; 张林静等^[6]研究了新疆阜康荒漠绿洲过渡带的植物种类多样性与土壤环境因子的耦合关系及主要植物种的生态位; 张峰等^[7]研究了新疆策乐荒漠绿洲过渡带景观格局与水资源的变化关系。但尚未见通过土壤颗粒分形维数来表征荒漠绿洲边缘区生态过渡带土壤特性的研究。

本文通过分析荒漠绿洲边缘区生态过渡带的土壤颗粒分形特征来反映该区的土壤特性, 这为维持过渡带生态系统功能和绿洲的土地资源合理开发利用提供了理论依据, 对绿洲的生态恢复重建和稳定的可持续发展具有非常重要的意义。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于黑河中游甘肃省临泽县北部的绿洲边缘区, 地理坐标为 39°20' N, 100°06' E, 地处戈壁荒漠、巴丹吉林沙漠和张掖绿洲的交汇处。该区属典型的大陆性干旱气候, 多年平均降水量为 117 mm, 且多集中于 7、8、9 三个月, 约占全年降水量的 60%~65%, 年蒸发量为 2390 mm, 空气相对湿度 45%~49%; 年平均气温 7.6℃, 最高气温达 39.1℃, 最低气温为 -27℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的年积温为 3088℃, 无霜期 105 天; 风向以西北风为主, 年平均风速为 3.2 m/s, 最大风速为 21 m/s, >8 级的大风日数年平均为 15 天, 风沙活动主要集中在 3 至 5 月。土壤以灰棕漠土和风沙土为主, 其中灰棕漠土为地带性土壤。主要的天然植被有红砂 (*Reaumuria soongorica*)、珍珠 (*Salsola passerina*) 和泡泡刺 (*Nitraria sphaerocarpa*)

①基金项目: 国家林业科技支撑计划专题项目 (2006BAD26B08-03) 资助。

作者简介: 陈小红 (1980—) 女, 甘肃兰州人, 博士研究生, 主要从事干旱区土壤研究。E-mail: chenxiaohong1125@sina.com.cn

等；人工植被多以杨树 (*Populus simonii*)、沙枣 (*Elaeagnus angustifolia*)、柽柳 (*Chinese Tamaris*)、梭梭 (*Haloxylon ammodendron*)、花棒 (*Hedysarum scopar*)、柠条 (*Caragana korshinskii*)、沙拐枣 (*Calligonum mongolicum*) 为主。主要作物为春小麦、棉花和玉米等。

1.2 土壤样品的采集与化学分析

采样区设在临泽县平川镇一工程村的荒漠绿洲边缘区。2006 年 8 月初在这条过渡带上沿主风向 (南北) 从荒漠边缘的流动沙地开始经过半流动沙地、半固定沙地、到固定沙地最后延伸至绿洲边缘的防护林到种植棉花的农田, 每隔 100 m 设 1 条样带, 共设 12 条样带, 以 1, 2, 3……12 表示, 在第 7 条样带处有方草格和砾石块压沙带。在每条样带上沿东西方向间隔 20 m 设 1 个样点, 共设 3 个, 作为 1 条样带的 3 个重复, 在每个样点 3 m 半径范围内取 0 ~ 20 cm 土层混合样, 带回实验室进行土壤理化性质测定。从流动沙地到农田, 植被种类的变化依次为裸露 → 沙拐枣 → 白刺 + 沙拐枣 → 白刺 + 沙拐枣 + 梭梭 → 大片梭梭林 → 杨树防护林 → 棉花地。

土壤理化性质的测定主要根据文献[8]和[9]介绍的方法进行, 其中: 土壤机械组成采用比重计法; 土壤有机质 (SOM) 采用铬酸氧还滴定的外热源法 (有机质的含碳量平均为 580 g/kg, 故有机碳 (SOC) = SOM × 58%); 土壤全氮 (TN) 采用半微量开氏法; 土壤全磷 (TP) 采用钼锑抗比色法; 土壤速效氮 (AN) 采用碱解-扩散法; 土壤速效磷 (AP) 采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法。

1.3 土壤颗粒分形维数求解模型

土壤是一种由不同大小和形状的固体颗粒及孔隙构成的多孔介质, 具有自相似特征或分形特征, 其分形特点是由颗粒大小分形维数 (又称分维数或分维) 来描述的^[10-11]。由于在土壤分析中得到的是土壤粒径的重量分布值, 因此本文采用 1993 年杨培岭等^[11]提出的用粒径的重量分布代替数量分布的土壤分形模型, 来计算土壤的颗粒分形维数。

具有自相似结构的多孔介质土壤由大于某一粒径 d_i ($d_i > d_{i+1}$, $i = 1, 2, \dots$) 的土粒构成的体积 $V(\delta > d_i)$ 可由公式表示^[10-11]:

$$V(\delta > d_i) = A \left[1 - (d_i/k)^{3-D} \right] \quad (1)$$

式中: δ 为测定尺度, A 、 k 是描述形状、尺度的常数, D 为土壤颗粒分形维数。

通常粒径分析资料是由一定粒径间隔的粒径重量分布表示的。以 $\bar{d}_i$ 表示两筛分粒径 d_i 与 d_{i+1} 间的

粒径平均值, 忽略各粒径间土粒比重 ρ 的差异, 即 $\rho_i = \rho$ ($i = 1, 2, \dots$), 则:

$$W(\delta > \bar{d}_i) = V(\delta > \bar{d}_i) \rho = \rho A \left[1 - (\bar{d}_i/k)^{3-D} \right] \quad (2)$$

式中: $W(\delta > \bar{d}_i)$ 为大于 d_i 的累积土粒重量, W_0 表示土壤各粒径颗粒重量之和。由定义有 $\lim_{i \rightarrow \infty} \bar{d}_i = 0$, 则由(2) 式得:

$$W_0 = \lim W(\delta > \bar{d}_i) = \rho A \quad (3)$$

由 (2), (3) 式导出:

$$W(\delta > \bar{d}_i)/W_0 = 1 - (\bar{d}_i/k)^{3-D} \quad (4)$$

设 $\bar{d}_{\max}$ 为最大粒径土粒的平均直径, $w(\delta > \bar{d}_{\max}) = 0$, 代入 (4) 式有 $k = \bar{d}_{\max}$ 。由此得出土壤颗粒的重量分布与平均粒径的分形关系式:

$$W(\delta > \bar{d}_i)/W_0 = 1 - (\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})^{3-D} \quad (5)$$

$$\text{或 } (\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})^{3-D} = W(\delta < \bar{d}_i)/W_0 \quad (6)$$

式中: $W(\delta < \bar{d}_i)$ 为粒径小于 d_i 的颗粒累积重量。土壤颗粒分形维数 D 可通过 (5) 式或 (6) 式取对数后, 再用回归法求得。

1.4 数据处理

本文利用 SPSS13.0 软件和 Excel 计算土壤颗粒分形维数, 并分析其与土壤粒度组成及土壤养分的关系。

2 结果与分析

2.1 土壤理化特征及土壤颗粒分形特征

图 1 是从荒漠边缘向绿洲延伸的过渡带上不同采样带的土壤养分变化曲线。由图 1 可知, 荒漠区到绿洲区的过渡带上, 各养分指标的变化曲线除样带 7 至 10 之间有一个曲线低谷外, 其余样带均呈递增趋势, 其中 TN 和 TP 的变化幅度较小, SOC 和速效养分的变化幅度较大。这说明从荒漠向绿洲的过渡过程中, 土壤质地基本处于好转状态, 但整体水平相对较低。样带 7 至 10 之间的曲线低谷较靠近绿洲区, 其各养分指标既低于绿洲区又低于荒漠区, 应该是所谓的“生态裂谷”, 这与许多学者的研究结果相似^[3-4]。生态裂谷是由绿洲边缘不合理的土地利用方式以及绿洲地下水资源的过度开发利用等人类活动造成的, 一般处在绿洲边缘人类活动最剧烈的区域, 该裂谷的存

在对绿洲生态环境的稳定和绿洲的可持续发展极为不利,是绿洲区发生荒漠化的直接诱发因素^[3-4]。曲线上各养分指标的峰值都位于采样带 12,虽然样带 12 是

种植棉花的农田,并且采样时棉花又正值生长旺盛期,土壤养分处于最大消耗期,这应该是土地经营者的施肥行为改变了土壤养分的现状。

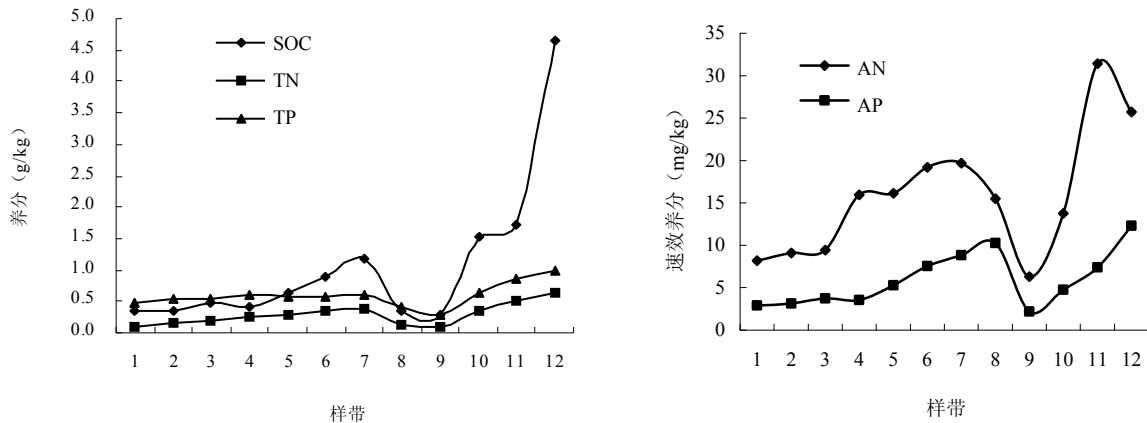


图 1 不同样带土壤养分变化曲线

Fig. 1 Variation of soil nutrients in different sampling zones

土壤颗粒分形维数是反映土壤结构几何形态的参数,可作为土壤质地综合性的量化指标,在维数上表现为土壤黏粒含量越高,质地越细,分形维数越高^[12-14]。本研究运用回归分析法,由式 (6) 计算出 12 个采样带的土壤颗粒分形维数,结果见表 1。从不同粒

级土壤颗粒的含量明显看出该采样区各样带土壤砂粒含量占绝对优势,粉粒居中,黏粒最少,这说明采样区土壤质地较粗,因此该区土壤颗粒分形维数在 2.105 ~ 2.609 之间变动,平均值仅为 2.280,处于极低水平。

表 1 不同样带土壤粒级分布及土壤颗粒分形维数

Table 1 Soil particle size distribution and fractal dimension of soil particle in different sampling zones

样带	不同粒径 (mm) 土壤颗粒含量 (g/kg)						分形维数
	粗砂粒	细砂粒	极细砂粒	粗粉粒	细粉粒	黏粒	
	(1 ~ 0.25)	(0.25 ~ 0.1)	(0.1 ~ 0.05)	(0.05 ~ 0.02)	(0.02 ~ 0.002)	(<0.002)	
1	339.2	528.4	83.9	5.2	20.9	22.4	2.105
2	173.5	631.9	135.3	9.5	26.3	23.5	2.138
3	169.7	579.5	186.0	13.7	24.8	26.3	2.149
4	159.4	524.3	210.8	35.4	42.8	27.3	2.258
5	139.0	553.4	215.1	21.6	48.0	22.9	2.246
6	132.3	571.6	192.7	20.9	54.5	28.0	2.289
7	112.9	533.1	227.0	28.6	67.2	31.2	2.341
8	158.4	540.9	204.3	25.8	41.8	28.8	2.251
9	200.6	608.6	112.0	19.2	33.6	26.0	2.200
10	164.1	491.1	205.6	32.8	76.6	29.8	2.370
11	124.0	493.5	221.6	43.4	82.2	35.3	2.400
12	62.4	279.0	339.2	76.1	201.1	42.2	2.609

由图 2 不同样带土壤颗粒分形维数的变化曲线可以看出,分形维数与土壤各养分指标具有相似的变化趋势,除样带 7 至 10 之间有一个曲线低谷外,整

体上呈上升趋势,且在样带 12 达到最大值。该结果同样说明从荒漠向绿洲的过渡过程是土壤质地逐渐好转的过程,但整体较差,在荒漠区与绿洲区之间且较

靠近绿洲区存在一个“生态裂谷”。

2.2 土壤颗粒分形维数与土壤粒度组成的关系

通过对土壤颗粒分形维数的计算可知,土壤颗粒分形维数的计算与土粒粒径由小到大的累积含量有关。相关性分析表明(表 2),土壤颗粒分形维数与砂粒含量(1 ~ 0.05 mm)呈显著的负相关关系, r 为 -0.966***,而与粉粒(0.05 ~ 0.002 mm)、黏粒(<0.002mm)含量呈强正相关关系, r 分别为 0.963***、0.940***,这说明分形维数随着砂粒含量的增多,不断减小,而随着黏粉粒含量的增多,不断增大,这与其他研究结果中土壤质地由粗到细变化,颗粒分形维数由小到大的结论相一致^[11-14]。

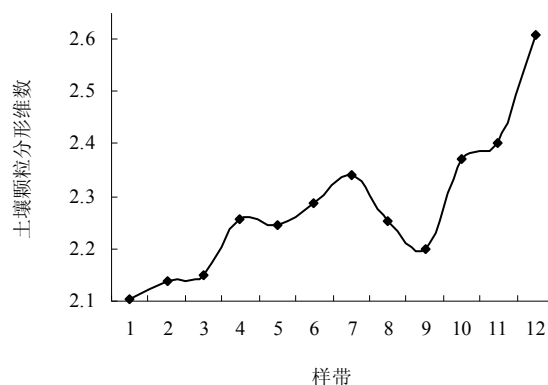


图 2 土壤颗粒分形维数变化趋势

Fig. 2 Variation of fractal dimension of soil particle

表 2 土壤颗粒分形维数与土壤各粒级含量和各养分指标的回归分析拟和结果

Table 2 Correlation between fractal dimension and contents of sand, silt, clay, nutrients

项目	回归方程	相关系数	显著水平
SA (g/kg)	$D = -0.0019SA + 3.924$	-0.966***	$p < 0.001$
SI (g/kg)	$D = 0.002 SI + 2.109$	0.963***	$P < 0.001$
CL (g/kg)	$D = 0.023CL + 1.617$	0.940***	$P < 0.001$
SOC (g/kg)	$D = 0.103SOC + 2.169$	0.918***	$P < 0.001$
TN (g/kg)	$D = 0.760TN + 2.060$	0.932***	$P < 0.001$
TP (g/kg)	$D = 0.625TP + 1.906$	0.826**	$P < 0.01$
AN (mg/kg)	$D = 0.015AN + 2.042$	0.803*	$P < 0.05$
AP (mg/kg)	$D = 0.033AP + 2.082$	0.772*	$p < 0.05$

注: D 指土壤颗粒分形维数; SA 指 1 ~ 0.05 mm 砂粒的含量; SI 指 0.05 ~ 0.002 mm 粉粒的含量; CL 指 <0.002 mm 黏粒的含量。

荒漠绿洲边缘区生态过渡带由于风蚀作用和人类活动的影响,土壤颗粒组成不断发生着变化,极大地影响着土壤颗粒分形维数。表 2 中土壤颗粒分形维数与各理化指标的回归分析拟和结果表明,砂粒每增加 1 g/kg,颗粒分形维数 D 降低 0.0019 个单位;粉粒和黏粒每增加 1 g/kg,颗粒分形维数 D 分别增加 0.002 和 0.023 个单位。这说明不同粒级对土壤颗粒分形维数变化幅度的影响依次为黏粒>粉粒>砂粒,分形维数对黏粒含量的变化最为敏感。颗粒分形维数很好地反映了土壤颗粒物质的变化状况,土壤颗粒组成又直接影响到土壤的某些物理性质和化学性质,进一步反映在土壤肥力上^[15]。因此可以将土壤颗粒分形维数作为评价荒漠绿洲边缘区土壤结构、肥力状况及土壤退化程度的指标之一。

2.3 土壤颗粒分形维数与土壤养分的关系

由表 2 可知土壤颗粒分形维数与土壤 SOC、TN、TP、AN、AP 都呈显著的正相关, r 分别为 0.918***、0.932***、0.826**、0.803*、0.772*,这说明荒漠区向绿洲区的过渡带上土壤颗粒分形维数随着土壤

各养分含量的提高而增大,这与前人的研究结果相似^[15-17]。上述结果进一步表明,可以将土壤颗粒分形维数作为衡量荒漠绿洲边缘区土壤养分变化状况的指标之一,用于反映荒漠绿洲区土壤的退化状况。

3 结论

(1) 荒漠区向绿洲区的过渡带上,土壤中砂粒含量占绝对优势,粉粒居中,黏粒最少;土壤颗粒分形维数在 2.105 ~ 2.609 之间变动,平均值仅为 2.280,处于极低水平。土壤各养分指标与颗粒分形维数有相似的变化趋势,从样带 1 至 12,除靠近绿洲区的样带 7 至 10 之间有一个“生态裂谷”外,整体上呈上升趋势,这表明从荒漠向绿洲的过渡过程中,土壤质地基本处于好转状态,但整体水平相对较低,“生态裂谷”的存在对绿洲区的生态环境极为不利,是绿洲区发生荒漠化的直接诱发因素。

(2) 相关性分析表明,分形维数随着砂粒含量的增多,不断减小,呈显著的负相关;而随着黏粉粒含量的增多,不断增大,呈显著的正相关,这与其他学者

的研究结果一致。由回归分析法进行定量分析的拟和结果可知,砂粒每增加 1 g/kg, 颗粒分形维数 D 降低 0.0019 个单位; 粉粒和黏粒每增加 1 g/kg, 颗粒分形维数 D 分别增加 0.002 和 0.023 个单位。这说明不同粒级对土壤颗粒分形维数变化幅度的影响依次为黏粒>粉粒>砂粒, 分形维数对黏粒含量的变化最为敏感。可以将土壤颗粒分形维数作为评价荒漠绿洲边缘区土壤结构、肥力状况及土壤退化程度的指标之一。

(3) 通过相关分析, 土壤颗粒分形维数随着土壤各养分含量的提高而增大, 呈显著的正相关, 这与人人在其他地区的研究结果相似。因此, 可以将土壤颗粒分形维数作为衡量荒漠绿洲边缘区土壤养分变化状况的指标之一, 用于反映荒漠绿洲区土壤的退化状况。

参考文献:

- [1] 赵成义, 王玉朝, 李国振. 荒漠-绿洲边缘区研究. 水土保持学报, 2001, 15 (3): 97-97
- [2] 王惠, 赵文智, 常学向. 黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异. 生态学报, 2007, 27 (5): 1731-1739
- [3] 张勃, 孟宝, 郝建秀, 丁文晖. 干旱区绿洲-荒漠带土壤水盐异质性及生态环境效应研究—以黑河中游张掖绿洲为例. 中国沙漠, 2006, 26 (1): 81-84
- [4] 贾宝全, 慈龙骏, 蔡体久, 高志海, 丁峰. 绿洲-荒漠交错带环境特征初步研究. 应用生态学报, 2002, 13 (9): 1104-1108
- [5] 何志斌, 赵文智. 黑河流域荒漠绿洲过渡带两种优势植物种群空间格局特征. 应用生态学报, 2004, 15 (6): 947-952
- [6] 张林静, 岳明, 顾峰雪, 张远东, 潘晓玲, 赵桂仿. 新疆阜康绿洲荒漠过渡带植物群落物种多样性与土壤环境因子的耦合关系. 应用生态学报, 2002, 13 (6): 658-662
- [7] 张峰. 策勒绿洲及其荒漠过渡带景观格局与水资源变化关系之研究 (硕士学位论文). 乌鲁木齐: 新疆大学, 2003: 16-43
- [8] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978
- [9] 鲍士旦主编. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [10] Turcotte DL. Fractals and fragmentation. J. Geophys. Res., 1986, 91 (12): 1921-1926
- [11] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38 (20): 1896-1899
- [12] 张世熔, 邓良基, 周倩, 伍国锋. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系. 土壤学报, 2002, 39 (2): 221-226
- [13] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究. 土壤学报, 1999, 36 (2): 163-167
- [14] 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. 土壤肥料, 2005 (6): 7-11
- [15] 贾晓红, 李新荣, 张景光, 张志山, 王新平, 谭会娟. 沙冬青灌丛地的土壤颗粒大小分形维数空间变异性分析. 生态学报, 2006, 26 (9): 2827-2833
- [16] 苏永中. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征. 生态学报, 2004, 24 (1): 71-75
- [17] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征. 土壤学报, 2002, 39 (6): 877-881

Fractal Characteristics of Soil Particle of Desert-Oasis Ecotone

CHEN Xiao-hong¹, DUAN Zheng-hu¹, HE Hong-ze²

(1 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2 Resource and Environment College of Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: By field survey and lab analysis, soil particle distribution and the contents of organic carbon, total N, total P, available N and available P were examined and fractal dimension of soil particle was calculated in desert-oasis ecotone in the middle reaches of Heihe River basin, then the relationship between soil particle fractal dimension and soil physical-chemical properties were discussed by adopting statistic analytical methods. The results showed that in this ecotone from desert to oasis, sand dominated particle composition, while silt and clay were little, soil texture generally was coarse. The fractal dimension of soil particle ranged from 2.105 to 2.609. Fractal dimension and soil nutrients index showed similar increasing trends, with an “ecological gap” close to oasis. By correlation analysis the content of sand exhibited a significant negative correlation with fractal dimension, but the contents of silt, clay and soil nutrients showed significant positive correlation. The content of sand, silt and clay increased 1g/kg respectively, the relevant change of fractal dimension was -0.0019, 0.002 and 0.023, the influence extent on the change of fractal dimension was clay>silt>sand, it was sensitive to clay. So soil particle fractal dimension could be used as an index to evaluate soil nutrients and the degree of soil degradation in desert-oasis ecotone.

Key words: Desert-oasis, Ecotone, Fractal dimension of soil particle