山地学报
MOUNTAIN RESEARCH

文章编号：1008－2786－(2025)2－195－12
DOI：10.16089/j.cnki.1008－2786.000886

引用格式：胡祉昱，张思盈，张知菲，刘忆南，林勇明. 生态系统转换时土壤分形维数变化的 Meta 分析[J]. 山地学报，2025，**43**(2)：195－206.
HU Zhiyu，ZHANG Siying，ZHANG Zhifei，LIU Yinan，LIN Yongming. Meta-analysis of soil fractal dimension changes during ecosystem conversion [J]. Mountain Research，2025，**43**(2)：195－206.

生态系统转换时土壤分形维数变化的 Meta 分析

胡祉昱[a]，张思盈[b]，张知菲[c]，刘忆南[b]，林勇明[b,d*]
（福建农林大学 a. 林学院；b. 菌草与生态学院；c. 国际学院；
d. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室，福州 350002）

摘　要：土壤颗粒分形维数(Soil Fractal Dimension，SFD)是定量评估土壤质量演变的综合性指标。生态系统类型、气候梯度等地理要素对土壤分形特征具有显著的塑造作用。前期对土壤分形维数的研究主要针对小尺度区域，多聚焦于单一地理要素(如降水或地形)的局部影响，大尺度区域背景下多种地理因素对土壤分形维数的影响效应研究不足。本研究整合多源文献数据，采用 Meta-analysis(荟萃分析)方法，在宏观尺度上分析生态系统更替时土壤分形维数的变化规律、驱动因子及其对降水量、温度的响应机制。结果表明：(1) 生态系统演替显著提升土壤分形维数数值(D_S)。低覆盖草地(含裸地)向灌丛、森林及较高覆盖草地转型时，分形维数呈现显著增大趋势($P<0.05$)，其变化率(Rate of change in SFD，ΔD_S)排序由大到小依次为较高覆盖草地($\Delta D_S=5.82\%$)、灌丛($\Delta D_S=4.59\%$)、森林($\Delta D_S=4.47\%$)、农田($\Delta D_S=2.10\%$)。表明植被恢复对土壤分形维数的提升作用具有显著生态系统依赖性。(2) 降水梯度调控效应明显。在湿润区(年均降水量，Mean Annual Precipitation，$\rho_A>400$ mm)，低覆盖草地转为森林、灌丛时 ΔD_S 达 3.94% 与 2.17%；在干旱半干旱区($\rho_A\leqslant400$ mm)，转为较高覆盖草地、灌丛和森林时 ΔD_S 分别为 9.13%、7.02% 和 5.53%。降水阈值($\rho_A=400$ mm)效应揭示了水分条件对土壤结构改良功效。(3) 地形分异的塑造作用显著。除沙漠外，向森林转换时 D_S 值普遍提升；在高原、沙漠区，向灌丛转换时的土壤改良效应最为显著($\Delta D_S>7\%$)；在丘陵区，向农田转换时则出现唯一的显著负响应($\Delta D_S=-2.00\%$)，凸显人类耕作对土壤结构的特殊影响。(4) 气候带调控作用突出。温带及中温带林灌草系统、亚热带林灌系统的 D_S 值增幅均超过 6%。年降水量可解释 12% 的 SFD 变异(决定系数 $R^2=0.12$，$P<0.001$)，其贡献率远超地形因子($R^2=0.009$)和温度因子($R^2=0.005$)，证实降水量是其核心驱动因子。本研究创新性建立了全国尺度生态系统转换-土壤分形维数的响应模式，加深了对生态系统转变时土壤结构稳定性和发展演替阶段的认识。

关键词：生态系统演变；土壤分形维数；Meta 分析；降水量
中图分类号：K903　　**文献标志码：**A

土壤系统具有分形特征。其粒径分布、颗粒表面形态及孔隙结构等在统计尺度上呈现显著的自相似性，即局域尺度的土壤微观单元与宏观系统遵循相同的概率分布规律[1]。土壤粒径分布(Particle Size Distribution，PSD)是表征土壤物理性质的关键参数，不仅直接影响土壤持水性、透气性和养分迁移效率，更是评估土壤退化程度和生态恢复潜力的重要指标[2]。基于分形理论建立的土壤颗粒分形维数(Soil Fractal Dimension，SFD)作为量化土壤结构复杂性的关键参数，不仅能够表征土壤质地、通透性及抗侵蚀能力的动态变化，更可作为评估土壤质量演变的综合性指标[3]，特别是在量化土地荒漠化过

收稿日期(Received date)：2024-10-10；改回日期(Accepted date)：2025-04-02
基金项目(Foundation item)：国家自然科学基金(42071132)。[National Natural Science Foundation of China (42071132)]
作者简介(Biography)：胡祉昱(2003－)，女，江西南昌人，本科生，主要研究方向：自然地理学。[HU Zhiyu (2003－)，female，born in Nanchang，Jiangxi Province，B.S. candidate，research on physical geography] E-mail：hzy0825@126.com
＊**通讯作者**(Corresponding author)：林勇明(1982－)，男，博士，教授，主要研究方向：自然地理学、恢复生态学。[LIN Yongming (1982－)，male，Ph.D.，professor，research on physical geography and restoration ecology] E-mail：monkey1422@163.com

程、评估生态修复效益等领域展现出实际应用价值，受到土壤生态学领域的广泛关注[4-5]。

已有研究[6-7]表明，生态系统类型、气候梯度等地理要素对土壤分形特征具有显著塑造作用，但存在两个亟待解决的科学问题：其一，受限于小尺度观测的空间局限性，不同研究对土壤结构与分形维数关系的结论存在显著分歧，难以解析大尺度地理格局下分形维数的变异规律及其环境驱动机制；其二，现有研究多聚焦于单一地理要素（如降水或地形）的局部影响，缺乏多因子协同作用下分形维数的系统响应研究。上述两种认知局限严重制约了土壤分形理论在生态恢复实践中的应用。

本研究采用 Meta 分析框架，整合前人多源独立观测数据集，以低覆盖草地生态系统（植被覆盖度≤20%）为基准参照，揭示多因子驱动下不同生态系统类型转换过程中土壤分形维数的时空分异规律、驱动因子及其对降水量、温度的响应机制。研究结果可为优化中国生态脆弱区植被恢复模式、提升土地可持续管理策略提供理论依据和决策支持。

1 数据收集与处理

1.1 数据收集与筛选

本文检索数据均来源于公开发表的期刊论文，最后检索时间为 2023 年 9 月 15 日。通过中国知网（CNKI）、Web of Science、NATURE、SCIENCEDIRECT 等文献检索系统，以“分形维数”“土壤粒径”“土壤颗粒”“Soil particle size of distribution”“Soil particle”等为关键词，检索 2003 年以来已发表的相关文献。为防止文献遗漏，采用“滚雪球”方式进一步筛查相关文献，并参照以下标准进行筛选。

（1）文献依照美国制土壤颗粒分级标准，划分颗粒直径（d）为 7 个等级：黏粒（≤0.002 mm）、粉粒（0.002 ~ 0.05 mm）、极细砂（0.05 ~ 0.1 mm）、细砂（0.1 ~ 0.25 mm）、中砂（0.25 ~ 0.5 mm）、粗砂（0.5 ~ 1 mm）、极粗砂（1 ~ 2 mm）。

（2）文献中研究区至少含有一种生态系统类型。

（3）研究区域属于中国陆地生态系统。

（4）所选研究结果相互独立，对于同一研究下的多篇文献只选择最新发表的一篇。

基于上述标准，本研究最终从 31 篇相关文献中共获取 87 组有效数据，土类包括亚热带红壤、暖温带黄棕壤、西南河谷变性土、西北高原的高山草甸土、西北沙漠的风沙土和栗钙土等，土质为砂质土、砂壤土、粉砂壤土等，涉及中国大部分典型区域。

1.2 数据提取与数据库建立

从筛选文献的图表及文字表述中获取相关数据和研究区概况，若研究结果仅以图片形式表示，则通过 Getdata 软件进行数据提取。通过 Excel2023 对文献中的有效数据及信息进行整合，数据集主要包括研究区位置（经度和纬度）、气候情况（气候类型、年均温和年均降水量）、土壤类型、生态系统类型（盖度≤20% 的低覆盖草地或裸地、盖度 > 20% 的较高覆盖草地、农田、灌丛、森林）、土壤粒径（7 级）的体积占比等相关参数，并采用 Metawin2.1 和 SPSS22.0 对数据进行统计分析，使用 Graph pad Prism8.0.2 进行图表绘制。

1.3 数据补全

若文献中存在数据缺失的现象，数据需进行补全处理，方法有如下两种。

（1）若研究区的气候、土壤等基本概况缺失，通过查找相同作者或同源学派作者在同一研究区、相同时间的相关研究文献进行补全。

（2）根据研究区域相关信息（如经纬度、土壤相关理化性质等），在中国土壤科学数据库中对邻近地点和土壤进行搜索，以补全数据。

1.4 数据换算

将筛选得到的土壤粒径体积占比数据进行转化，最终获得符合本研究目的的数据。根据王国梁[8]等提出的通过土壤粒径体积分布计算土壤分形维数 D_S 的方法，其公式为：

$$\frac{V_i}{V_0} = \left(\frac{d_i}{d_m}\right)^{3-D_S} \tag{1}$$

式中，V_i 为粒径小于 d_i 的颗粒体积；d_i 为粒径分区中第 i 等级的粒径；V_0 为土壤颗粒总体积之和；d_m 为实际土壤最大粒径。对式（1）两边同时取对数，并进行线性回归拟合，可得：

$$\log\left(\frac{V_i}{V_0}\right) = (3 - D_S)\log\left(\frac{d_i}{d_m}\right) \tag{2}$$

利用式（2）通过数据拟合可以得到 D_S 值。

2 研究方法

2.1 Meta 分析

Meta 分析（Meta-analysis），也称荟萃分析或元

分析,通过定量整合的方法对具有共同研究目的、相互独立的实验结果进行分析,从而得出不同研究间的差异并获取大尺度的变化特征。Meta 分析在相同的资金与精力的投入条件下,研究尺度远大于独立研究,能够实现整体格局变化趋势和综合因子的整合分析,从而得出具有普适性、高可用性、高质量的综合分析结果,在学术界已得到广泛应用[9-11]。

本文通过 Metawin 软件进行 Meta 分析,选取适应性更强的对数响应比(Natural Log-Transformed Response Ratio,LRR)作为不同生态系统转换时对土壤分形维数影响的效应值 y[12],软件中需输入对照组(低覆盖草地或裸地,下文简称为低覆盖草地)和实验组(其他类型生态系统)的土壤分形维数均值、标准差、样本容量。效应值 y 计算公式如下[13]:

$$y = \ln\left(\frac{\overline{x_e}}{\overline{x_c}}\right) = \ln(\overline{x_e}) - \ln(\overline{x_c}) \tag{3}$$

式中,$\overline{x_e}$和 $\overline{x_c}$分别为实验组和对照组的平均值。

每个效应值对应的方差 $V(y)$ 计算公式如下[14]:

$$V(y) = \frac{S_e}{n_e\,\overline{x_e}^2} + \frac{S_c}{n_c\,\overline{x_c}^2} \tag{4}$$

式中,S_e 和 S_c 分别为实验组和对照组的标准差;n_e 和 n_c 分别为实验组和对照组的样本容量。

由于不同研究区的地理位置和自然环境不同,需同时考虑各研究组间和组内的差异,本文选用随机效应模型,计算公式如下[14]:

$$w_i = \frac{1}{V(y) + \tau^2} \tag{5}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{k}(w_i y_i)}{\sum_{i=1}^{k} w_i} \tag{6}$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{k} W_i}} \tag{7}$$

$$CI(95\%) = \bar{y} \pm t_{0.05} SE \tag{8}$$

式中,每个研究效应值 y 的权重为 w_i;τ^2 为研究组间方差;$\bar{y}$ 为加权平均效应值;y_i 为单一研究的效应值;SE 为标准误差;k 为纳入分析的研究组数。式(8)用以计算平均效应值的 95% 置信区间。

为更好地解释生态系统转换时对土壤分形维数的影响效应的强度,本文计算土壤分形维数百分比变化率(Rate of change in SFD,ΔD_S),公式如下[13]:

$$\Delta D_S = (e^y - 1) \times 100\% \tag{9}$$

若平均效应值的 95% 置信区间(Confidence Interval, CI)均大于 0,则认为生态系统转换对土壤分形维数的改变具有显著正效应($P < 0.05$);若 95% 置信区间均小于 0,则认为生态系统转换对土壤分形维数的改变具有显著负效应($P < 0.05$);若 95% 置信区间包含 0,则认为生态系统转换对土壤分形维数的改变无显著效应($P > 0.05$)[15]。

2.2　多重共线性与贡献率分析

研究多因素对某一指标的影响时,如果有两个及以上的自变量相关度高,难以区分单个自变量的影响作用,即存在多重共线性[16]。由于 Pearson 相关系数不能直接检测 3 个及以上变量之间的相关性,可通过方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, VIF)检测多个自变量间的共线性程度,其定义表达式为:

$$V_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \tag{10}$$

式中,V_j 为 VIF 值;R_j^2 表示 X_j 为解释变量时对其他解释变量辅助线性回归的可决系数。R_j^2 增大,V_j 也随之增大,表示共线性程度的增加。当 $V_j \geqslant 10$ 时,解释变量 X_j 与其他解释变量间存在严重的多重共线性;反之,R_j^2 减小,共线程度降低,V_j 也随之减小,若解释变量之间无线性关系,则 $R_j^2 = 0$,V_j 也会达到最小值 1[17]。当 $V_j < 10$ 时,便可认为自变量之间没有共线性问题存在,可以采用多因子分析的方法,比较不同自变量对因变量影响的贡献率大小。

本研究探讨年均降水量、地形和气候带 3 个因素对生态系统转换前后土壤分形维数变化的效应值的影响并分析其贡献率,利用 SPSS 22.0 软件进行多元线性回归分析,计算不同影响因素的 V_j 值,选取 $V_j < 10$ 的因素进行贡献率分析,以比较在中国生态系统转换时不同因素对土壤分形维数影响的重要性。

3　结果分析

3.1　生态系统转换对土壤分形维数的总体影响

通过比较低覆盖草地与其他类型生态系统的土壤分形维数,探究生态系统转变时土壤分形维数的变化趋势。低覆盖草地转换为灌丛、较高覆盖草地、森林时,其土壤分形维数变化具有显著正效应($P < 0.05$),而低覆盖草地转换为农田时,其土壤分形维数变化未达显著水平($P > 0.05$)(图 1)。低覆盖草地转换为灌丛、草地、森林时,其土

壤分形维数效应值依次为 0.0520（95% 置信区间为 0.0295～0.0745）、0.0445（95% 置信区间为 0.0287～0.0603）和 0.0378（95% 置信区间为 0.0223～0.0533），分别增加了 4.59%、5.82% 和 4.47%；低覆盖草地转换为农田生态系统时，土壤分形维数变化未达显著水平（$P>0.05$），其综合效应值为 0.0126（95% 置信区间为 −0.0166～0.0400）。效应值由大到小依次为灌丛、较高覆盖草地、森林、农田。变化率由大到小依次为较高覆盖草地、灌丛、森林、农田。

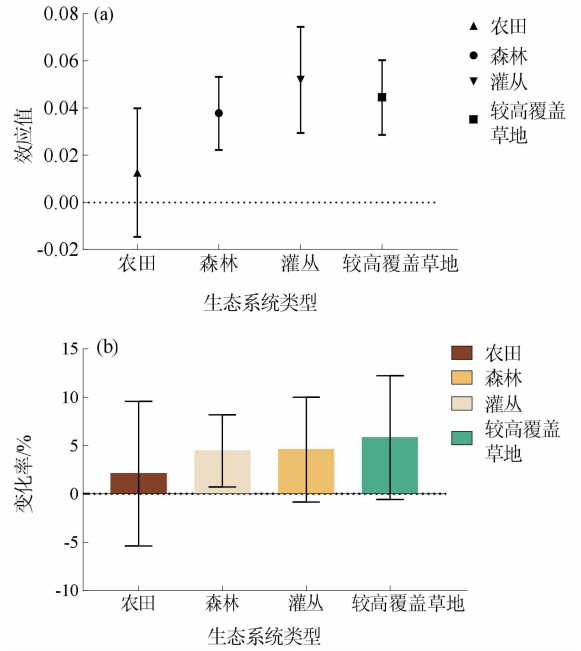


图 1 不同生态系统土壤分形维数的效应值及其变化率：（a）效应值；（b）变化率

Fig. 1 Effect value of soil fractal dimension and its rate of change in different ecosystems: (a) effect value; (b) ratio of change

3.2 生态系统转换对土壤分形维数影响的亚组分析

3.2.1 年均降水量

以低覆盖草地的土壤分形维数作为对照组，其他生态系统的土壤分形维数作为实验组，并以年均降水量≤400 mm 和 >400 mm 作为分组依据，探究不同年均降水量在生态系统转换时对土壤分形维数的影响效应，由于 ρ_A≤400 mm 区域农田研究数少于 2 条，无统计学意义，因此不予分析。根据 Meta 分析结果（图 2）可知，ρ_A >400 mm 时，低覆盖草地转换为森林、灌丛时，对土壤分形维数具有显著正效应（$P<0.05$），且森林的增加幅度为 3.94%（95% 置信区间为 0.0226～0.0489），高于灌丛的增加幅度 2.17%（95% 置信区间为 0.0110～0.0413）；低覆盖草地转换为较高覆盖草地时，其增加幅度为 1.48%（95% 置信区间为 −0.0051～0.0197），未达显著水平。当 ρ_A≤400 mm 时，低覆盖草地转换为灌丛、较高覆盖草地、森林时，其对土壤分形维数均具有显著正效应（$P<0.05$），其中草地增幅 9.13%（95% 置信区间为 0.0685～0.0995）明显高于灌丛 7.02%（95% 置信区间为 0.0592～0.0944）和森林 5.53%（95% 置信区间为 0.0149～0.0622）。除农田外，各生态系统在 ρ_A≤400 mm 地区土壤分形维数的增幅均大于 ρ_A >400 mm 地区，说明在干旱区与半干旱区进行植被恢复对土壤结构的改良效果优于湿润区。

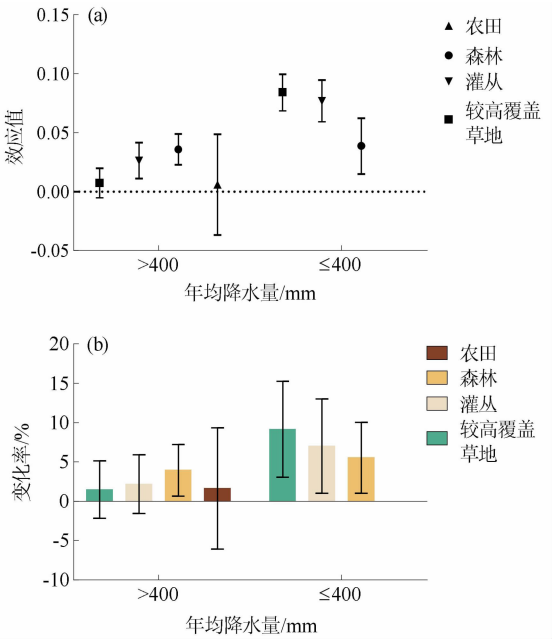


图 2 不同年均降水对不同生态系统土壤分形维数的效应值及变化率的影响：（a）效应值；（b）变化率

Fig. 2 Influence of different annual average precipitation on the effect value of soil fractal dimension and ratio of change in different ecosystems: (a) effect value; (b) ratio of change

3.2.2 地形

以相同研究区低覆盖草地的土壤分形维数为对照组，其他生态系统为实验组，根据文献信息，将地形分为山地、沙漠、高原、平原、丘陵、谷地，以地形为研究的分类亚组，探究不同地形对生态系统转换时土壤分形维数的影响效应，由于森林的沙漠亚组研究数少于 3 条，无统计学意义；农田的高原亚组研究

数少于 3 条,无统计学意义;仅森林有山地亚组,其他生态系统无山地亚组,无横向比较的意义,因此在分析时去除这些亚组的结果。

Meta 分析结果显示(图 3),在丘陵地区,低覆盖草地向农田转换时,土壤分形维数显著降低($P<0.05$),变化率为 -2.00%(95% 置信区间为 -0.0404 ~ -0.0059);而向森林转换时,土壤分形维数增大,变化率为 3.06%(95% 置信区间为 0.0022 ~ 0.0314)。在谷地地区,低覆盖草地向灌丛和森林转换时,土壤分形维数均显著增大($P<0.05$),变化率分别为 2.59%(95% 置信区间为 0.0083 ~ 0.0441)和 4.28%(95% 置信区间为 0.0215 ~ 0.0506);转换为较高覆盖草地时,土壤分形维数的变化未达显著水平($P>0.05$)。在平原地区,低覆盖草地向森林转换时,土壤分形维数显著增大($P<0.05$),变化率为 5.10%(95% 置信区间为 0.0135 ~ 0.0875);向灌丛转换时,土壤分形维数的变化未达显著水平($P>0.05$)。在高原地区,由低覆盖草地向灌丛、较高覆盖草地和森林转换时,土壤分形维数变化均具有显著正效应($P<0.05$),其中,向灌丛转变时,土壤分形维数的变化率为 7.57%(95% 置信区间为 0.0401 ~ 0.1210);向较高覆盖的草地转化时,土壤分形维数的变化率为 5.62%(95% 置信区间为 0.0378 ~ 0.0880);向森林转化时,土壤分形维数变化率为 7.66%(95% 置信区间为 0.0348 ~ 0.0822)。在沙漠地区,由低覆盖草地向灌丛和较高覆盖草地转换时,土壤分形维数的变化均具有显著的正效应($P<0.05$),其中,向灌丛转换时,土壤分维数的变化率为 9.58%(95% 置信区间:0.0346 ~ 0.1118),向较高覆盖草地转化的过程中,土壤分形维数的变化率为 10.53%(95% 置信区间:0.0676 ~ 0.1137)。总体而言,土壤分形维数的变化率(绝对值)由大至小依次为沙漠、高原、平原、谷地、丘陵。

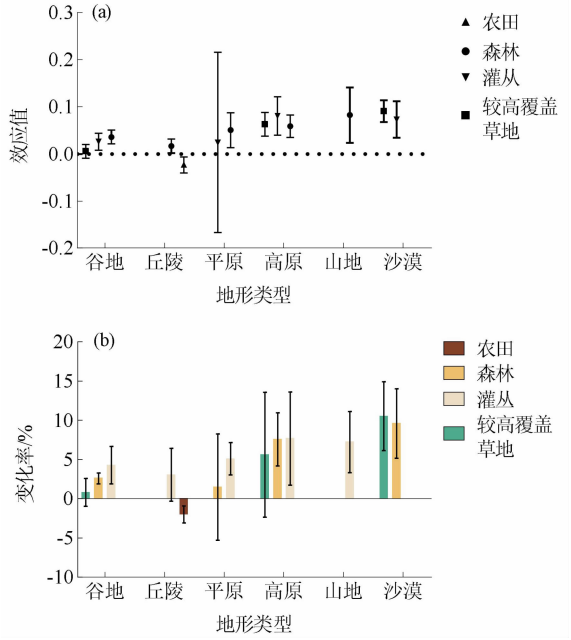


图 3　不同地形对不同生态系统土壤分形维数的效应值及变化率的影响:

(a)效应值;(b)变化率

Fig. 3　Influence of different topography on the effect value of soil fractal dimension and ratio of change in different ecosystems:

(a) effect value; (b) ratio of change

3.2.3　温度带

整合收集的数据情况,本研究以低覆盖草地土壤分形维数作为对照组,其他生态系统为实验组,并根据郑景云[18]等绘制的中国气候区划图作为亚组划分依据,分为亚热带、暖温带、中温带和温带。如图 4 所示,在温带,低覆盖草地转换为较高覆盖草地、灌丛、森林时,土壤分形维数变化具有显著正效应($P<0.05$),土壤分形维数分别增加 11.52%(95% 置信区间为 0.0482 ~ 0.1313)、6.77%(95% 置信区间为 0.0310 ~ 0.0970)、4.94%(95% 置信区间为 0.0147 ~ 0.0505),其转换为农田时,土壤分形维数增加 6.81%(95% 置信区间为 -0.0531 ~ 0.1510),但无显著效应($P>0.05$)。在暖温带,低覆盖草地转换为农田时,土壤分形维数减少 1.72%(95% 置信区间为 -0.0926 ~ 0.0568);转换为灌丛、森林时,土壤分形维数分别增加 1.46%(95% 置信区间为 -0.1667 ~ 0.2155)、2.65%(95% 置信区间为 -0.0032 ~ 0.0499),但其变化均未达显著水平($P>0.05$)。在中温带,低覆盖草地转换为灌丛、较高覆盖草地、森林时,土壤分形维数变化具有显著正效应($P<0.05$),土壤分形维数分别增加了 6.91%(95% 置信区间为 0.0290 ~ 0.1948)、8.78%(95% 置信区间为 0.0645 ~ 0.1103)、6.00%(95% 置信区间为 0.0098 ~ 0.1215)。在亚热带,低覆盖草地转换为灌丛、森林时,土壤分形维数具有显著正效应($P<0.05$),土壤分形维数分别增加 2.95%(95% 置信区间为 0.0088 ~ 0.0437)、3.43%(95% 置信区间为 0.0098 ~ 0.1215),而转变为较高覆盖草地时,

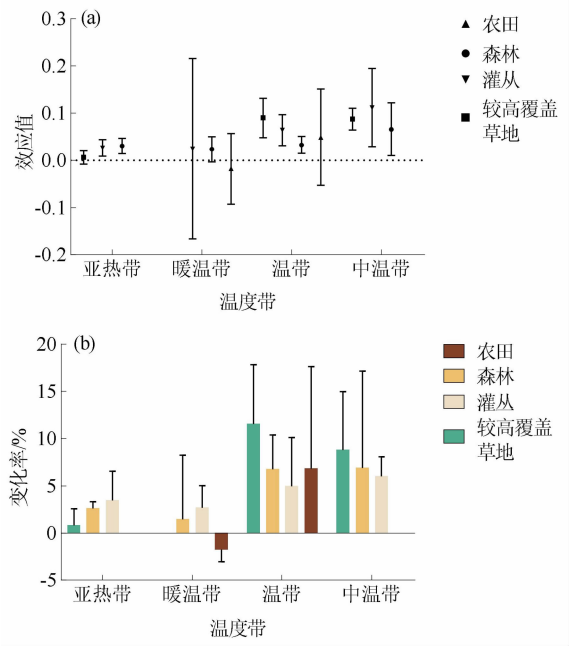


图 4 不同年均温对不同生态系统土壤分形维数的效应值及变化率的影响:(a)效应值;(b)变化率

Fig. 4 Influence of different annual mean temperatures on the effect value of soil fractal dimension and ratio of change in different ecosystems: (a) effect value; (b) ratio of change

其土壤分形维数变化未达显著水平($P>0.05$)。

3.2.4 不同因素对土壤分形维数影响的贡献率

在分析不同因素对土壤分形维数影响的基础上,对定性数据进行定量化后,对年降水量、地形和温度带 3 个因素的贡献率进行比较。由表 1 可知,3 种因素对生态系统转变前后的土壤分形维数效应值的方差膨胀因子均小于 10,说明这 3 个因素间不存在多重共线性,可进行多因素分析。

表 1 不同影响因素的方差膨胀因子(VIF)值和标准化回归系数

Tab. 1 The variance values and standardized regression coefficients of different influencing factors

影响因素	VIF 值	标准化回归系数 β	R^2	P 值
年均降水量	1.248	0.395	0.120	<0.001
地形	1.037	0.137	0.009	0.171
气温	1.260	0.077	0.005	0.483

选用多因素线性回归分析方法,利用 SPSS 22.0 计算出不同影响因素对土壤分形维数的标准化回归系数,该系数的绝对值越大,表明其对土壤分形维数的贡献率越大。结果表明,年均降水量、地形、气温对土壤分形维数的标准化回归系数(β)依次为 0.395、0.137、0.077,年均降水量对生态系统转换前后的土壤分形维数变化的贡献率最大,可以解释 12%($R^2=0.12$)的土壤分形维数变化,远大于地形因子和气温因子。说明年均降水量是土壤分形维数变异的核心驱动因子,在干旱区进行植被恢复对于土壤结构的改良效果更为显著。

4 讨论

4.1 生态系统转换对土壤分形维数的影响机制

本文研究结果表明,以低覆盖草地为对照组,其向其他生态系统转换时土壤分形维数均呈现增加效应,分形维数均值变化由高到低依次为较高覆盖草地、灌丛、森林、农田,其中除农田外,转换为其他 3 种生态系统时呈现显著效应,与王红营[19]等研究结果相近。与低覆盖草地比较,较高覆盖草地植被覆盖率提高,能有效削弱风速、拦截风沙,使更多小粒径颗粒物质沉降,数量增多的植物根系可促进土壤中微生物化学风化,同时其土壤颗粒风化作用优于乔木、灌木[20],导致土壤细小颗粒含量多于森林、灌丛生态系统,因此从低覆盖草地转换为较高覆盖草地时,分形维数值变化量最大。相较于草地,森林虽多具有良好的植被群落结构,但中国范围内森林林下结构差异大,湿润区森林改善土壤结构而干旱区森林却出现土壤结构退化[21],造成土壤分形维数出现两极分化,因此森林土壤分形维数值低于草地、灌丛。农田因受到翻耕等人为因素影响,地表植被覆盖度较低,土壤暴露于地表,加上其土层较松软,受侵蚀作用,细小颗粒易发生流失,土壤粗颗粒残留,使农田土壤呈粗化和沙化趋势[22],因此农田的土壤分形维数的变化率低于其他生态系统,且无显著正效应。

4.2 生态系统转换时年均降水量对土壤分形维数的影响机制

生态系统转换时土壤分形维数变化受年均降水量的影响存在一定差异,$\rho_A>400$ mm 地区主要属于中国湿润、半湿润地区,低覆盖草地转换为其他类型生态系统时,分形维数值变化率最高值和最低值分别为森林和较高覆盖草地。其原因主要为在中国较湿润地区,森林林下植被覆盖度高,地表凋落物多,

林冠及地表凋落物能减缓雨滴对土壤的击溅、削弱地表径流,避免土壤细颗粒受雨水冲刷,且丰富的凋落物分解后能提高土壤黏粒含量,因此低覆盖草地转换为森林生态系统时土壤分形维数变化率最高[23]。与森林比较,较高覆盖草地的地表土壤植被覆盖度较低,草地根系植物对地表径流的拦截作用随着降水量的增多而减弱,充足的降水溅散大颗粒物,加上产生的地表径流冲蚀表土[24],冲刷地表细颗粒物,导致其细颗粒物含量降低,因此仅提高草地盖度对土壤分形维数变化影响最低。

$\rho_A \leqslant 400$ mm 地区主要属于中国干旱、半干旱地区,低覆盖草地转为较高覆盖草地时土壤分形维数变化率达到最高值,其次是灌丛、森林生态系统,与刁二龙[25]等、马文芳[26]等的研究结论一致。在干旱、半干旱地区,水分是植被生长发育的限制因素之一,其与年均降水量紧密相关[27]。较高覆盖草地因以草本植物为主要优势种,其根系分布均匀稠密,且草本植物贴近地表,可削弱风蚀作用,有效减少土壤颗粒的流失[28]。而森林中乔木生长发育所需水量远高于草地、灌丛,因此在干旱、半干旱区,乔木林生长大量消耗土壤水分,且其根茎分布较深,吸收大量土壤水分,导致其土壤含水量降低,进而结构松散,孔隙度增大,加之林下植被稀疏[19,26],风对土壤表层细小颗粒的吹蚀搬运作用较强,森林生态系统土壤细颗粒含量降低,因此其土壤分形维数低于较高覆盖草地、灌丛。

4.3　生态系统转换时地形因子对土壤分形维数的影响机制

在中国丘陵地区,由低覆盖草地向农田转换的过程中,土壤分形维数呈显著负效应,有研究表明,人为耕作加速土壤黏化,一定程度上提高了农田的土壤黏粒含量,表现出黏化趋势[29]。然而,耕作将原本在下层的细颗粒翻耕至地表,在降水及重力的作用下极易受蚀流失,造成土壤中的细颗粒含量大幅减少,破坏土壤原本的结构,分形维数较低覆盖草地更低。在由低覆盖草地向森林转换的过程中,土壤分形维数呈显著正效应,这主要归因于森林植被的以下特征:植物种类丰富;植被数量多;可通过多种途径共同影响水土流失。具体表现为:(1)林冠截留降水,地被物减轻降雨对土壤的溅蚀力;(2)削弱地表径流、滞缓流速,降低冲蚀力,避免土粒流失;(3)养分发生选择性富集,改善土壤结构,增加土壤团聚体的黏合力,提高土壤抗蚀和抗冲性能,降低土壤的可侵蚀性;(4)通过根系网加固黏结土体,强化土壤的稳定性[30],因此细颗粒流失较少,土壤分形维数与低覆盖草地相比,具有显著正效应。

在谷地地区,低覆盖草地向灌丛和森林转换的过程中,均具有显著正效应,森林的变化率大于灌丛。这是由于森林生态系统具有更复杂的结构、更高大的植被以及更发达的根系系统,从而表现出更强的径流调控和泥沙拦截能力,使得侵蚀沟发育速度减缓[31],最终导致土壤分形维数变化率更大。

在平原地区,低覆盖草地向森林转换过程中,土壤分形维数显著增大;向灌丛转换过程中,土壤分形维数的变化未达显著水平($P > 0.05$)。主要原因是:在平原地区,森林生态系统中产生的大量凋落物改善了土壤持水能力,对土壤稳渗率产生显著影响[32],与稳渗率呈显著正相关的土壤分形维数随之显著增大[33]。

在高原地区,由低覆盖草地向灌丛、较高覆盖草地和森林转换过程中,土壤分形维数变化均具有显著正效应($P < 0.05$),其中土壤分形维数变化率由大到小依次为森林、灌丛、较高覆盖草地。这可能是由于高原地区森林较灌丛、灌丛较草地的根系分布更深,提升了土壤水分保持能力并形成良好的团聚体,形成微孔隙,使土壤结构趋于复杂和稳定[34],进而增加土壤细颗粒数量,对土壤结构的均一化、细粒化产生更多的正向影响。此外,由于森林的形成时间较灌丛和草地更长,在高原地区随着生长年限的增加,土壤趋于细粒化,土壤分形维数有所上升[35]。

在沙漠地区,由低覆盖草地向灌丛和较高覆盖草地转变的过程中,土壤分形维数的变化均具有显著的正效应($P < 0.05$),其中,向较高覆盖草地转换的变化率大于向灌丛转变部分。由于沙漠地区大多为风成地貌,降水稀少。土壤流失以风蚀为主,灌丛盖度小于较高覆盖草地,导致灌丛根系对土壤的固着能力弱于较高覆盖草地[36],细粒径的土壤颗粒易被风蚀,留下粗颗粒,致使其分形维数低于较高覆盖草地,沙漠化程度也更高。由此可知,在沙漠地区,提高覆盖度对荒漠化防治的效果尤为关键。

4.4　不同因素对土壤分形维数影响的贡献率

本文研究区的年均降水量、地形和气温带均对

生态系统转换后的土壤分形维数产生了不同程度的影响。经过多因素线性回归分析可知,年均降水量对土壤分形维数变化的贡献率最大。在干旱区进行植被恢复后,土壤分形维数增加效应更大。这可能是由于土壤细颗粒的含量与土壤分形维数和含水量显著正相关[37-38]。在干旱区,地表覆盖可提高土壤含水量,而在降水充沛地区,覆盖会使土壤含水量降低[39],且高强度的降水也是表土流失的重要原因[40]。水分可有效填充与稳定团聚体,呈现正向有益循环效应。由此可知,在降水量较少的地区营建适宜的生态系统,通过维持一定地表覆盖度,减少侵蚀的发生,可稳定与改良土壤理化性质。

4.5 不足与展望

本研究首次在全国尺度上探讨并揭示了生态系统转换对土壤分形维数的变化规律及其驱动因素,明晰了不同生态系统对土壤物理性质改变的制约因素,为各区域合理制定土壤恢复生态措施提供了依据。然而,本文仅在土壤分形维数对降水量、地形和温度因子的响应机制上进行了研究分析,针对人为因素、土壤的化学性质、其他地理因子以及不同地理因子间交互效应的研究还不充分,后续可进一步深入研究。

5 结论

(1)低覆盖草地向灌丛、森林和较高覆盖草地转换时,土壤分形维数呈显著增加,其变化量(绝对值)从大到小分别为较高覆盖草地(ΔD_S = 5.82%)、灌丛(ΔD_S = 4.59%)、森林(ΔD_S = 4.47%)、农田(ΔD_S = 2.10%),表明植被恢复对土壤分形维数的提升作用具有显著生态系统依赖性。

(2)在干旱半干旱区($\rho_A \leqslant 400$ mm),低覆盖草地向其他类型生态系统转变时,土壤分形维数变化率总体上大于湿润区($\rho_A > 400$ mm)。其中,在湿润区,低覆盖草地转为森林、灌丛时 ΔD_S 为 3.94% 和 2.17%;在干旱半干旱区,转为较高覆盖草地、灌丛和森林时,ΔD_S 分别为 9.13%、7.02% 和 5.53%,水分条件对土壤结构的改良功效存在梯度调控效应。

(3)不同地形条件对土壤分形维数变化的影响效应不同。在高原与沙漠区,低覆盖草地向灌丛转换时的土壤改良效应最为显著($\Delta D_S > 7\%$);在丘陵区,低覆盖草地向农田转换时则出现唯一的显著负响应($\Delta D_S = -2.00\%$),表明人类耕作对土壤结构具有一定的负面影响。

(4)在不同温度带,土壤分形维数变化同样存在一定程度的差异。温带及中温带林灌草系统、亚热带林灌系统的 D_S 增幅均超过 6%,表明以林灌草系统进行生态恢复对中国中北部地区土壤结构存在较高的增益,在水热充沛的亚热带地区,林灌系统的恢复增益优于其他系统。年降水量可解释 12% 的土壤分形维数变异($R^2 = 0.12$, $P < 0.01$),其贡献率远超地形因子($R^2 = 0.009$)和温度因子($R^2 = 0.005$),证实降水量是其核心驱动因子。

参考文献(References)

[1] LI Songyang, GAO Ruoyun, HUANG Maowei, et al. Multifractal features of particle-size distribution and their relationships with soil erosion resistance under different vegetation types in debris flow basin [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, **10**: 927862. DOI: 10.3389/feart.2022.927862

[2] QI Fei, ZHANG Ronghua, LIU Xia, et al. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region [J]. Soil and Tillage Research, 2018, **184**: 45-51. DOI: 10.1016/j.still.2018.06.011

[3] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J]. 地理研究, 2002, **21**(6): 700-706. [DING Wenfeng, DING Dengshan. The fractal features of soil granule structure before and after vegetation destruction on loess plateau [J]. Geographical Research, 2002, **21**(6): 700-706] DOI: 10.1007/s11769-002-0038-4

[4] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报, 1999, **36**(2): 162-167. [WU Chengzhen, HONG Wei. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns [J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, **36**(2): 162-167] DOI: 10.11766/trxb199706200203

[5] 张秦岭, 李占斌, 徐国策, 等. 丹江鹦鹉沟小流域不同土地利用类型的粒径特征及土壤颗粒分形维数[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(2): 244-249. [ZHANG Qinling, LI Zhanbin, XU Guoce, et al. Soil particle-size distribution and fractal dimension of different land use types in Yingwugou small watershed of Dan River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(2): 244-249] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2013.02.039

[6] 罗清虎, 吴建召, 崔羽, 等. 洪涝灾害干扰下受损自然恢复林地土壤基本性状及分形维数特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, **25**(1): 29-37. [LOU Qinghu, WU Jianzhao, CUI Yu, et al. Characteristics of soil properties and fractal dimensions of

destroyed and naturally restored forest land under flood disaster disturbance [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, **25**(1): 29 – 37] DOI: 10.19675/j.cnki.1006 – 687x.2018.04032

[7] 黄语芯, 虞西尔, 高若允, 等. 干热河谷植物沙丘形态及植物功能性状特征与土壤分形维数的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2022, **28**(4): 1019 – 1026. [HUANG Yuxin, YU Xier, GAO Ruoyun, et al. Relationship between morphological and functional characteristics of phytogenic mounds and soil fractal dimensions in a dry-hot Jiangjiagou valley [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, **28**(4): 1019 – 1026] DOI: 10.19675/j.cnki.1006 – 687x.2021.09021

[8] 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 Guoliang, ZHOU Shenglu, ZHAO Qiguo. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, **42**(4): 545 – 550]

[9] CHEN Xiaoyan, ZHOU Ji. Volume-based soil particle fractal relation with soil erodibility in a small watershed of purple soil [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **70**(4): 1735 – 1746. DOI: 10.1007/s12665 – 013 – 2261 – y

[10] 郭明, 李新. Meta 分析及其在生态环境领域研究中的应用[J]. 中国沙漠, 2009, **29**(5): 911 – 919. [GUO Ming, LI Xin. Meta-analysis: A new quantitative research approach in eco-environmental sciences [J]. Journal of Desert Research, 2009, **29**(5): 911 – 919]

[11] 黄茂伟, 田雪, 马心雨, 等. 我国耕地转变对净初级生产力的影响——基于 Meta 分析[J]. 应用与环境生物学报, 2023, **29**(4): 898 – 905. [HUANG Maowei, TIAN Xue, MA Xinyu, et al. Effects of farmland transformation on net primary productivity in China based on meta-analysis [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, **29**(4): 898 – 905] DOI: 10.19675/j.cnki.1006 – 687x.2022.08035

[12] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. Ecology, 1999, **80**(4): 1150 – 1156.

[13] SHI Xiaoqing, QIN Tianling, YAN Denghua, et al. A meta-analysis on effects of root development on soil hydraulic properties [J]. Geoderma, 2021, **403**: 115363. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115363

[14] JIA Zijian, WENG Baisha, YAN Denhua, et al. The effects of different factors on soil water infiltration properties in High Mountain Asia: A meta-analysis [J]. Catena, 2024, **234**: 107583. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107583

[15] CHEN Ying, FENG Jiguang, YUAN Xia, et al. Effects of warming on carbon and nitrogen cycling in alpine grassland ecosystems on the Tibetan Plateau: A meta-analysis [J]. Geoderma, 2020, **370**: 114363. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114363

[16] 肖霞, 伍兴国. 线性回归中多重共线性的几何解释[J]. 统计与决策, 2021, **37**(21): 46 – 51. [XIAO Xia, WU Xingguo. Geometric interpretation of multicollinearity in linear regression [J]. Statistics & Decision, 2021, **37**(21): 46 – 51] DOI: 10.13546/j.cnki.tjyjc.2021.21.009

[17] 高阳. 对多重共线性检测指标的一些研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019: 1 – 44. [GAO Yang. Some studies on multi-collinearity detection indicators [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 1 – 44]

[18] 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 中国 1951 – 1980 年及 1981 – 2010 年的气候区划[J]. 地理研究, 2013, **32**(6): 987 – 997. [ZHENG Jingyun, BIAN Juanjuan, GE Quansheng, et al. The climate regionalization in China for 1951 – 1980 and 1981 – 2010 [J]. Geographical Research, 2013, **32**(6): 987 – 997] DOI: 10.11821/yj2013060002

[19] 王红营, 郭中领, 王仁德, 等. 河北坝上植被恢复措施对土壤性质的影响[J]. 水土保持研究, 2016, **23**(5): 74 – 79 + 84. [WANG Hongying, GUO Zhongling, WANG Rende, et al. Effect of different restoration measures on soil properties in Bashang area, Hebei province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, **23**(5): 74 – 79 + 84] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.05.007

[20] 王国玲, 苏志珠, 毛丽, 等. 中国北方农牧交错带鄂尔多斯高原段土壤表层粒度特征[J]. 中国沙漠, 2019, **39**(3): 183 – 190. [WANG Guoling, SU Zhizhu, MAO Li, et al. Characteristics of soil surface grain size in Ordos plateau along the agro-pastoral ecotone of North China [J]. Journal of Desert Research, 2019, **39**(3): 183 – 190] DOI: 10.7522/j.issn.1000 – 694X.2019.00018

[21] 田卓, 张帅普, 王醒, 等. 龙脊梯田不同土地利用方式下土壤粒径分形特征[J]. 农业现代化研究, 2023, **44**(4): 724 – 735. [TIAN Zhuo, ZHANG Shuaipu, WANG Xing, et al. Fractal characteristics of soil particle under different land use patterns in Longji terrace [J]. Research of Agricultural Modernization, 2023, **44**(4): 724 – 735] DOI: 10.13872/j.1000 – 0275.2023.0066

[22] 苑依笑, 王仁德, 常春平, 等. 风蚀作用下农田土壤细颗粒的粒度损失特征及其对土壤性质影响[J]. 水土保持学报, 2018, **32**(2): 104 – 109 + 119. [YUAN Yixiao, WANG Rende, CHANG Chunping, et al. Loss characteristics of fine particles by wind in farmland and its effect on soil properties [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, **32**(2): 104 – 109 + 119] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.016

[23] 杨婷, 景航, 姚旭, 等. 黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征[J]. 水土保持研究, 2016, **23**(3): 1 – 5 + 24. [YANG Ting, JING Hang, YAO Xu, et al. Soil particle composition and its fractal dimension characteristics of different land uses in loess hilly region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, **23**(3): 1 – 5 + 24] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.03.001

[24] 李阳兵, 魏朝富, 谢德体, 等. 岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体分形特征研究[J]. 土壤通报, 2006, **37**(1): 51 – 55. [LI Yangbing, WEI Chaofu, XIE Deti, et al. The fractal features of soil aggregate structure before and after vegetation destruction on karst mountain areas [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, **37**(1): 51 – 55] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2006.01.011

[25] 刁二龙, 曹广超, 袁杰, 等. 香日德—柴达木河流域不同土地利用方式下土壤颗粒分形特征[J]. 西南农业学报, 2022, **35**(10): 2353 – 2360. [DIAO Erlong, CAO Guangchao, YUAN Jie, et al. Fractal characteristics of soil particles under different land use patterns in Xiangride-Chaidamu River Basin [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, **35**(10): 2353 – 2360] DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2022.10.015

[26] 马文芳, 朱云鹏, 郭倩倩, 等. 黄土丘陵区典型植被土壤剖面的颗粒分形特征[J]. 土壤, 2019, **51**(3): 578 – 585. [MA Wenfang, ZHU Yunpeng, GUO Qianqian, et al. Fractal characteristics of soil particle compositions in soil profiles of typical vegetation types on loess hilly region [J]. Soils, 2019, **51**(3): 578 – 585] DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2019.03.022

[27] 李孝广, 余新晓, 张振明, 等. 黄土区土壤水分与植物耗水研究[J]. 水土保持研究, 2007, **14**(5): 336 – 338. [LI Xiaoguang, YU Xinxiao, ZHANG Zhenming, et al. Study on soil water and the plant water consumption in the loess area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, **14**(5): 336 – 338]

[28] DURAN ZUAZO V H, RODRIGUEZ PLEGUEZUELO C R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: A review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2008, **28**(1): 65 – 86. DOI: 10.1051/agro:2007062

[29] 周雷, 曲潇琳, 周涛, 等. 宁夏土壤颗粒组成特点及其影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2023, **56**(21): 4272 – 4287. [ZHOU Lei, QU Xiaolin, ZHOU Tao, et al. Analysis of the characteristics and influencing factors of soil particle composition in Ningxia [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, **56**(21): 4272 – 4287] DOI: 10.3864/j.issn.0578 – 1752.2023.21.01

[30] 欧阳帅, 项文化, 陈亮, 等. 南方山地丘陵区森林植被恢复对水土流失调控机制[J]. 水土保持学报, 2021, **35**(5): 1 – 9. [OUYANG Shuai, XIANG Wenhua, CHEN Liang, et al. Regulation mechanisms of forest vegetation restoration on water and soil erosion in mountainous and hilly area of Southern China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, **35**(5): 1 – 9] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.001

[31] 杨启红. 黄土高原典型流域土地利用与沟道工程的径流泥沙调控作用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009: 83 – 95. [YANG Qihong. Study on the effect of land cover and gully engineerings on runoff and sediment regulation in typical watershed on loess plateu [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009: 83 – 95]

[32] 胡文杰, 庞宏东, 王晓荣, 等. 长江中游平原湖区人工林枯落物和表层土壤持水特性[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(3): 644 – 653. [HU Wenjie, PANG Hongdong, WANG Xiaorong, et al. Litter and topsoil water holding characteristics of artificial forest in basin plain lake area of Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, **30**(3): 644 – 653] DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202103012

[33] 谢燕燕, 郭子武, 林树燕, 等. 毛竹林下植被演替过程中土壤颗粒组成与水分入渗特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, **48**(3): 108 – 116. [XIE Yanyan, GUO Ziwu, LIN Shuyan, et al. Soil particle distribution and water infiltration characteristics during vegetation succession in Phyllostachys edulis stands [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024, **48**(3): 108 – 116] DOI: 10.12302/j.issn.1000 – 2006.202205039

[34] 齐雁冰, 常庆瑞, 惠泱河. 人工植被恢复荒漠化逆转过程中土壤颗粒分形特征[J]. 土壤学报, 2007, **44**(3): 566 – 570. [QI Yanbing, CHANG Qingrui, HUI Yanghe. Fractal features of soil particles in desertification reversing process by artificial vegetation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(3): 566 – 570] DOI: 10.11766/trxb200512210327

[35] 南富森. 祁连山不同植被类型区土壤理化性质及影响因素研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2023: 20 – 22. [NAN Fushen. Soil physicochemical properties and influencing factors in different vegetation type zones in the Qilian Mountains, China [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2023: 20 – 22] DOI: 10.27410/d.cnki.gxbfu.2023.001598

[36] 王成龙. 四种植物根系剪拉组合力损伤自修复后固土特性[D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学, 2021: 28 – 33. [WANG Chenglong. Study on the soil reinforcement of four plants roots damaged by shear-tensile combination [D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia Normal University, 2021: 28 – 33] DOI: 10.27229/d.cnki.gnmnu.2021.000042

[37] 刁二龙, 曹广超, 曹生奎, 等. 不同尺度下土壤粒径及分形特征[J]. 水土保持研究, 2024, **31**(5): 212 – 220. [DIAO Erlong, CAO Guangchao, CAO Shengkui, et al. Soil particle size and fractal characteristics at different scales [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, **31**(5): 212 – 220] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.015

[38] 蒋嘉瑜, 刘任涛, 张安宁. 干旱与半干旱荒漠草原区柠条灌丛土壤分形维数与理化性质对比分析[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(4): 54 – 61 + 69. [JIANG Jiayu, LIU Rentao, ZHANG Anning. Comparative analysis of soil fractal dimension and soil physical and chemical properties between caragana korshinskii shrub plantations in arid and semi-arid desert steppe [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(4): 54 – 61 + 69] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.04.008

[39] 麻虹宇, 李保国, 蔡斌, 等. 干旱半干旱区地表覆盖对土壤风蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2023, **30**(2): 29 – 35. [MA Hongyu, LI Baoguo, CAI Bin, et al. Effect of soil cover on soil

wind erosion in arid and semi-arid regions [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, **30**(2): 29 – 35] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.039

[40] 顾展飞, 魏海龙, 全鑫, 等. 降雨和坡度对桂北岩溶石山地区水土流失的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, **56**(3): 251 – 262. [GU Zhanfei, WEI Hailong, QUAN Xin, et al. Study on the effects of rainfall and slope on soil erosion in karst rocky mountain areas of northern Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, **56**(3): 251 – 262] DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.020

Meta-Analysis of Soil Fractal Dimension Changes during Ecosystem Conversion

HU Zhiyu[a], ZHANG Siying[b], ZHANG Zhifei[c], LIU Yinan[b], LIN Yongming[b,d*]

(*a. College of Forestry; b. College of Juncao Science and Ecology; c. International College; d. Key Laboratory of Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou* 350002, *China*)

Abstract: Soil quality could be quantitatively evaluated by soil fractal dimension (SFD), which is a comprehensive index deeply shaped by geographic factors such as ecosystem type and climatic gradient. Former scientific researches on SFD mostly were conducted on the basis of microscale areas, emphasizing localized effects of single geographic factors (e.g., precipitation or topography), but they neglected the joint impacts of multiple geographic factors on SFD in large-scale regional context.

In this study, it integrated multi-source literature data and used Meta-analysis approach to analyze SFD change, their driving factors and mechanisms of responses to precipitation and temperature during ecosystem conversation at a macroscale.

(1) It found that ecosystem succession significantly increased SFD values (hereafter denoted as D_S). A notable upward trend in D_S were observed during transitions from low-coverage grassland (including bare land) to shrubland, forest, and high-coverage grassland ($P < 0.05$), with the magnitude of increase (Rate of change in SFD, ΔD_S) ranked in descending order as high-coverage grassland ($\Delta D_S = 5.82\%$), shrubland ($\Delta D_S = 4.59\%$), forest ($\Delta D_S = 4.47\%$), farmland ($\Delta D_S = 2.10\%$). This highlights the ecosystem-dependent enhancement of SFD by vegetation restoration.

(2) Precipitation gradient had distinct regulatory effects on SFD. In humid zones (Mean Annual Precipitation, $\rho_A > 400$ mm), the conversion of low-coverage grassland to forest and to shrub had the 3.94% and 2.17% in ΔD_S, respectively, while in arid/semi-arid zones ($\rho_A \leqslant 400$ mm), the conversion to higher-coverage grassland, shrub, and forest had the ΔD_S of 9.13%, 7.02% and 5.53%, respectively. The precipitation threshold effect of 400 mm reveals the critical role of moisture in soil structure improvement.

(3) Topographic differentiation had significant shaping effect on SFD. D_S significantly increased as low-coverage grasslands converting to forests in all terrains except deserts. In plateau and desert, the conversion to shrub had the highest ΔD_S ($>7\%$), marking the greatest soil improvement effect. In hilly areas, the conversion to farmland had the only significant negative ΔD_S (-2.00%), signifying the specific impact of human cultivation on soil structure.

(4) Climate zone also regulated SFDs. Forest-shrub-grass systems in temperate and mid-temperate zones, as

well as subtropical forest-shrub systems, exhibited ΔD_S exceeding 6%. Annual precipitation explained 12% of the variance in SFDs ($R^2 = 0.12$, $P < 0.001$), surpassing the contributions of topographic ($R^2 = 0.009$) and temperature factors ($R^2 = 0.005$), confirming precipitation as the primary driver.

This study innovatively established a national scale response model linking ecosystem transitions to soil fractal dimension, deepening understanding of soil structural stability and successional stages during ecosystem transformations.

Key words: ecosystem transition; soil fractal dimension; Meta-analysis; precipitation

（责任编辑　钟雨倩）

成都市——天府之国的城乡融合发展

（江佳雯）

成都市位于我国四川盆地中西部的平原—山区过渡地带，拥有较完整的城乡地域系统，但城乡发展失衡，城乡融合功能失调。集镇作为城乡之间的桥梁可有效承接城市辐射和带动乡村发展，然而受制于自然条件和发展动力的影响，成都市集镇发展呈现显著的空间异质性。成都市作为国家城乡融合发展试验区，多样的地貌单元形成了城郊—远郊递减分布、平原—山区差异发展的集镇体系。因此，在新型城镇化和乡村振兴双重背景下，如何有效发挥集镇在城乡融合发展中连城带乡的关键性功能是目前亟需探讨的问题。构建“区-场-极”多级目标分析框架，或可为解析集镇发展差异及空间格局、促进城乡融合发展提供方法借鉴。

详见本期《2000—2020 年成都全域集镇空间格局演变及驱动因子》一文。