

近 35 年来华北典型农业区土壤 pH 时空变化及其驱动因子分析

魏鑫涛^{1,2}, 赵彦锋^{2*}, 牛银霞³, 侯占领³, 李怡欣², 陈杰²

(1. 郑州大学生态与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学农学院, 河南 郑州 450001;

3. 许昌市农业技术推广站, 河南 许昌 461000)

摘要: 土壤 pH 时空变化对评估区域土壤质量及其生态功能演变具有重要意义。较多研究报导了我国耕地土壤自 1980s 以来的酸化特征, 但鲜见报道自 2005 年大规模推行秸秆还田和配方施肥等措施后土壤 pH 变化。本文基于 3 个时期的 1287 个土壤样本 (0~20 cm), 采用序贯高斯模拟方法研究华北典型农业区土壤 pH 在 1984—2007 年和 2007—2017 年两个时期的变化, 以评估秸秆还田和配方施肥措施对区域土壤 pH 变化的影响。结果表明, 1984—2007 年潮土、非黄土母质发育褐土、砂姜黑土均明显酸化。2007—2017 年, 潮土土壤 pH 有所回升, 非黄土母质发育褐土酸化明显减缓, 但砂姜黑土持续酸化; 与其他区域不同, 黄土母质发育的褐土区土壤 pH 在 1984—2007 年和 2007—2017 年两个时间段均有升高。不同类型土壤 pH 降低和恢复幅度的不同, 部分归因于它们的质地和初始 pH 值差异; 黄土母质区土壤 pH 的升高与该区亚表层土壤 pH 高于表层、而表层土壤易遭受侵蚀的特征契合。为更好调节华北土壤 pH, 除坚持秸秆还田和配方施肥外, 还应结合土壤类型、土壤性质、母质和地形进行分类施治。

关键词: 土壤 pH; 秸秆还田; 配方施肥; 时空变化; 序贯高斯模拟

中图分类号: S147.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2021)05-1042-10

DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2020120201](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2020120201)

魏鑫涛, 赵彦锋, 牛银霞, 侯占领, 李怡欣, 陈杰. 近 35 年来华北典型农业区土壤 pH 时空变化及其驱动因子分析 [J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1042 - 1051

WEI Xin-tao, ZHAO Yan-feng, NIU Yin-xia, HOU Zhan-ling, LI Yi-xin, CHEN Jie. Spatiotemporal Changes of Soil pH in Recent 35 years and Driving Factors in a Typical Agricultural Region of North China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(5): 1042 - 1051

土壤 pH 对土壤肥力、污染物毒理、土壤碳氮转化、生物多样性等具有重要影响^[1-4], 是评价土壤质量及其生态功能的重要指标, 得到长期持续关注^[5-13]。Guo 等^[5]研究表明, 1980 s~2000 s 我国 90% 的农田土壤发生酸化, pH 降幅 0.13~0.80; 同期, 北方草原土壤 pH 下降了 0.63^[6]。一般认为过量施氮、大气酸沉降是导致土壤酸化的主因, 但同时受土壤类型、土地利用方式影响^[14-19]。不同时期土壤 pH 变化的主要因子也可能发生变化, 如 Xie 等研究表明, 在 1980 s~2000 s 苏南地区土壤 pH 下降主因是过量施肥, 但 2000~2015 年土壤 pH 下降主因是工业污染排放^[13]。此外在大部分区域土壤 pH 下降的同时, 也有局部土壤 pH 上升现象^[6, 10], 但往往没有充分讨论。

现有华北土壤 pH 变化的研究主要集中在 1980 s~2000 s 或者 1980 s~2010 s^[10-11]。而从 2005 年, 全国

开始大力推行秸秆还田和测土配方施肥技术。这一措施经历 10 年后, 是否对区域土壤 pH 变化产生影响还鲜见报道。认识这一问题的关键之一在于划分 2005 年前后这一重要节点, 并获得可与前后时期对比的土壤样品; 关键之二在于避开工业酸沉降的重要地区, 以真实反映秸秆还田等土壤管理措施改变对区域土壤质量的作用。根据 Cui 等研究, 我国淮河一线以北并没有明显的酸雨现象^[20]; 同时在市域尺度上, 如果土壤 pH 变化发生明显空间分异显然也不应归因于大尺度的大气环境因素, 而更多的源于土壤管理及土壤内部的反馈和调控差异。河南是我国北方农业区的典型代表, 受工业酸沉降影响不明显, 其主要农业土壤类型是潮土、褐土和砂姜黑土。许昌位于河南中部, 是褐土、潮土、砂姜黑土的交接地带, 可以作为区域土壤 pH 变化研究的典型代表。因

收稿日期: 2020-12-02; 修订日期: 2021-04-13

基金项目: 国家自然科学基金 (40801080, 41601210, 40971128) 资助

作者简介: 魏鑫涛 (1996-), 男, 河南南阳人, 硕士, 主要研究方向: 土壤环境质量。Email: 1241784905@qq.com

*通讯作者: Email: yfzhao@zzu.edu.cn

此, 本研究以河南许昌为研究区, 将研究期划分为两个阶段, 将近 10 年来土壤 pH 演变趋势与 1980 s—2000 s 进行对比, 以期增进理解推行秸秆还田和配方施肥对土壤变化的影响。

数字土壤制图技术是探索土壤 pH 空间分布及变异规律的常用方法^[21-23]。如 Ou 等^[22] 使用克里格插值、多元线性回归等方法, 确定了 1980—2010 年中国东北黑土区土壤 pH 的时空格局和影响因素; Gray 等^[23] 采用多重线性回归、随机森林和 Cubist 模型对土壤有机质、pH 等 6 种土壤属性进行了预测研究。土壤时空变化研究受不同时期采样点数量、分布和分析条件差异等客观因素影响, 数字制图结果不可避免具有不确定性, 地图差减还将这种不确定性传递并最终影响土壤 pH 变化判断的可靠性, 但随机模拟方法可将各种不确定因素的作用综合表现, 以概率的方式帮助研究者客观评价土壤 pH 变化^[13]。

因此, 本文以随机模拟方法对许昌市土壤 pH 时

空变异进行研究。具体目标是: 明确 1984—2007 年、2007—2017 年两个时期许昌市土壤 pH 的变化特点; 绘制不同时期土壤 pH 变化概率图, 确定其显著变化区域; 分析土壤 pH 时空变化的驱动因子。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区 (图 1a) 在东经 113°03′~114° 19′、北纬 33°42′~34°24′, 是伏牛山余脉向豫东平原过渡地带, 地势由西北向东南倾斜 (图 1b); 属暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 14.3~14.6 °C, 年平均降水量 671~736 mm; 总面积 4996 km², 其中平原面积 3638 km², 山地面积 521 km², 丘陵面积 836 km², 总耕地面积 3523 km²。研究区内土壤母质类型复杂, 西部边界和区内少数孤立山丘为石灰岩、石英岩类, 广大低山丘陵区覆盖黄土, 平原则为洪、冲积物和河湖相沉积物 (图 1c)。区内土壤类型 (如图 1d)

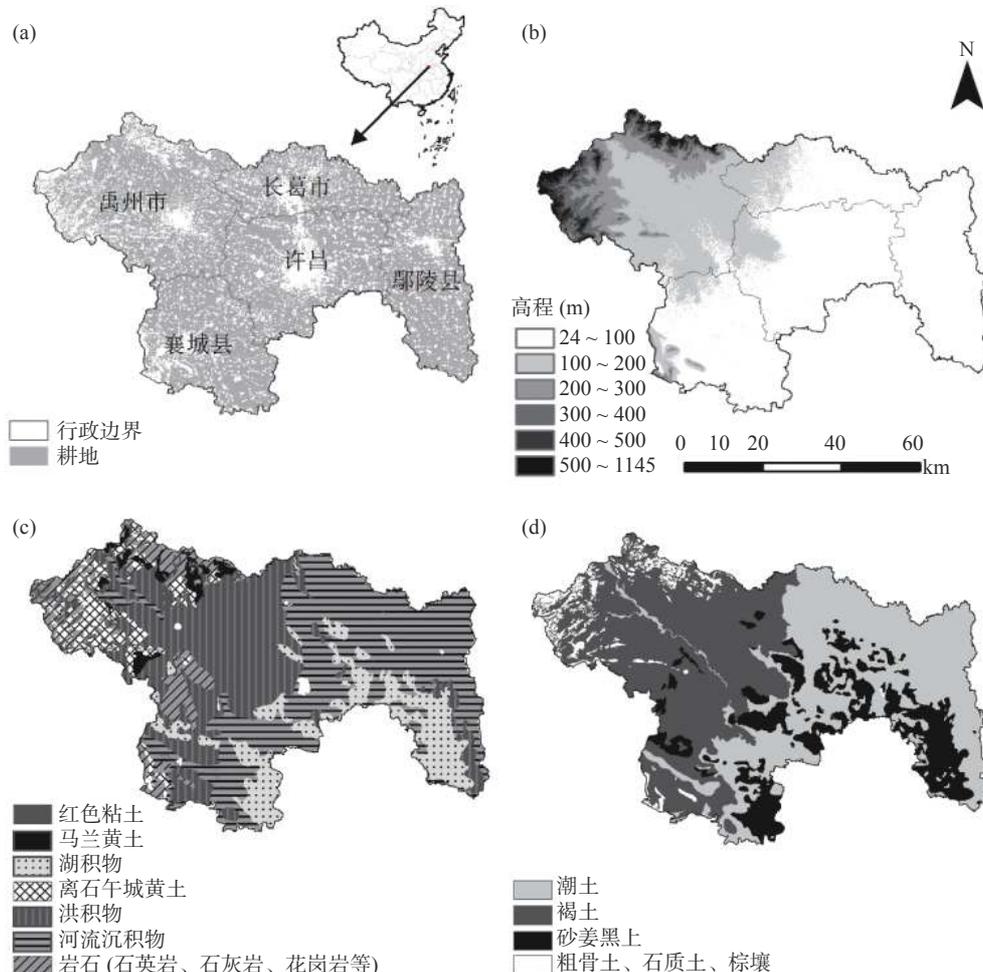


图 1 许昌市区位图(a)、地形图(b)、成土母质图(c)和土壤类型图(d)

Fig.1 The site of study area (a), topographic map (b), soil parent material map (c) and soil map (d)

以褐土、潮土、砂姜黑土为主, 面积占比约 94.6%。轮作制度以小麦—玉米为主, 一年两熟。

1.2 数据来源

1984 年数据源于第二次土壤普查, 共收集 175 个有详细记载和位置标注的采样点 (图 2), 采样深度 0 ~ 20 cm。2007 年采集 0 ~ 20 cm 土壤样本 556 个, 样点布设综合考虑了土壤类型、农业利用和交通可达性; 同时在典型黄土母质区密集布点采集 60 个双层土壤样本 (0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm); 2017 年参照 2007 年样点位置, 仍采集 556 个 0 ~ 20 cm 土壤样本 (图 2), 仅个别样点由于土地利用变化而有所调整。2007 和 2017 年土样均采用 GPS 确定坐标, 以坐标点周围 100 m² 范围内 5 个随机子样混合, 然后以四分法取舍。土样经风干、研磨、筛分后, 采用玻璃电极法测定土壤 pH 值, 土水比为 1 : 2.5^[24] (1984 年、2007 年和 2017 年的土壤 pH 值以下简称 pH₁₉₈₄、pH₂₀₀₇ 和 pH₂₀₁₇)。

1.3 研究方法

采用地统计学序贯高斯模拟研究土壤 pH 时空变化, 其步骤为: (1) 利用 python 编程寻求最优 Box-Cox 数据转化参数, 将数据转化为正态分布; (2) 采用 ArcGIS 10.5 地统计分析模块对转换后数据执行变异函数分析和简单 kriging 插值, 以已知数据为条件数据, 执行序贯高斯模拟。其关键步骤包括: i 建立覆盖研究区的栅格图层, 栅格分辨率设为 1 km; ii 建立访问每个栅格点的随机路径; iii 在每个栅格点搜索特定领域的条件信息 (包括已知数据点和已有模拟结果); iv 利用领域条件和 kriging 结果估算该点的条件概率累积分布函数, 根据该函数随机取值作为该点的一次模拟结果, 并将其加入到条件数据集中; 重复 iii-iv 步骤, 直到完成所有点的模拟^[13, 25]。(3) 将模拟结果逆变换为原始量纲, pH₁₉₈₄、pH₂₀₀₇ 和 pH₂₀₁₇ 各自得到 500 次等概率实现。(4) 三个时

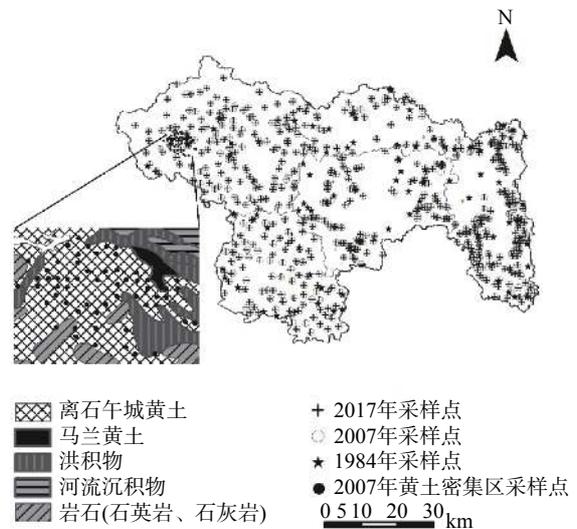


图 2 采样点分布

Fig.2 Distribution of sampling points

期的土壤 pH 分布图用各自 500 次模拟的均值表示, 用 matlab 编程逐位置实现三个时期模拟结果的随机相减 ($pH_{2017}-pH_{1984}$ 、 $pH_{2017}-pH_{2007}$ 、 $pH_{2007}-pH_{1984}$), 以 1000 次地图叠加随机相减结果判断三个时期每个位置的土壤 pH 变化概率。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 变化的描述性统计

表 1 表明, 1984—2007 年土壤 pH 平均下降 0.18, 变化明显; 2007—2017 年则升高 0.05, 变化不显著。然而 2017 年土壤 pH 变异系数增加, 最大值比 2007 年升高 0.4 而最小值降低 0.7, 说明仍有局部土壤进一步酸化。三个时期的土壤 pH 百分比结构对比表明 (图 3): 自 1984—2007 年, pH 8.0 ~ 8.5 的样点比例显著降低; 7.5 ~ 8.0 和 7.0 ~ 7.5 的比例则显著增加; 自 2007—2017 年, pH 大于 8.0 的样点比例有所回升, 但 pH 7.0 ~ 7.5 的样点比例进一步增加, 而且新增 5.3% pH < 7.0 样点。

表 1 许昌市表层土壤 pH 统计特征
Table 1 Statistical characteristics of soil pH in Xuchang

项目 Item	样点数 Number	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%) CV
pH ₁₉₈₄	175	7.03	8.64	8.16 a [*]	0.27	3.30
pH ₂₀₀₇	556	7.12	8.41	7.98 b	0.27	3.38
pH ₂₀₁₇	556	6.40	8.82	8.03 b	0.53	6.60

*注: 字母标注不同表示统计差异显著 ($p > 0.05$)

2.2 不同时期土壤 pH 随机模拟

pH₁₉₈₄、pH₂₀₀₇ 和 pH₂₀₁₇ 数据经变换后均符合正态

分布 (图 4)。pH₁₉₈₄、pH₂₀₀₇ 和 pH₂₀₁₇ 的半变异函数 (图 5) 表现出显著空间自相关结构, 其 Nugget/

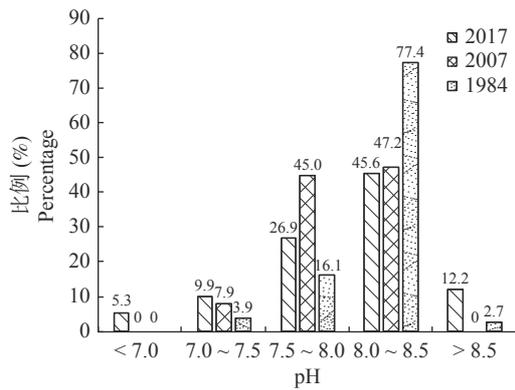


图 3 许昌市不同时期土壤 pH 对比

Fig.3 Comparison of soil pH values at different periods in Xuchang

Sill 值分别是 5.5%、20% 和 43%，符合序贯高斯模拟的数学要求，但该值逐渐增大也表现出土壤 pH 空间变化随机性持续增加的特征。

500 次模拟结果的均值图 (图 6) 表明, pH_{1984} 呈现出东高西低的格局: 东部平原区潮土和砂姜黑土 pH 主要分布在 8.2~8.4, 西部以褐土为主的地区土壤 pH 在 8.0~8.2, 而 pH 小于 8.0 的区域十分有限。 pH_{2007} 东、西部土壤 pH 差异缩小: 东部潮土和砂姜黑土 pH 几乎全部在 8.2 以下, 并以 7.8~8.0 为主; 西部在谷地和与平原交接区以洪积母质为主的褐土大部分 pH 从 8.0~8.2 下降为 7.8~8.0, 而低山丘陵以黄土母质为主的褐土则保持在 8.0~8.2, 甚至有少部分土壤由 8.0 以下升为 8.0~8.2。 2017 年, 东部潮土 pH 大部分从 7.8~8.0 升为 8.0~8.2, 但褐土和砂姜黑土原 pH 下降的区域回升面积较小 (主要在平原与山地交接区域); 同时, 西部黄土母质褐土 pH > 8.2 的面积显著扩大。

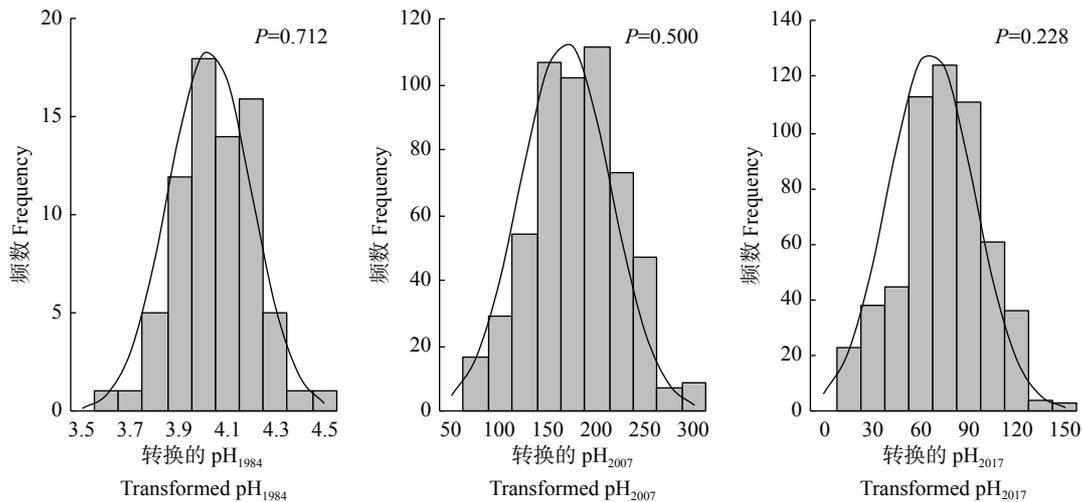


图 4 不同采样时期经数据转换后的土壤 pH 分布直方图

Fig.4 Histogram of transformed soil pH at different sampling periods

2.3 土壤 pH 变化概率的空间模式

本研究采纳 Xie 等的标准^[13], 以变化幅度是否 > 0.1 为判断 pH 变化的标准。根据 pH 计算原理, 0.1 的变化表示土壤溶液的 H^+ 浓度增加或减少 1.26 倍, 可以满足对分析误差的包容, 增进判断结果的可信度。不同时期 500 次土壤 pH 模拟图进行 1000 次随机相减, 生成土壤 pH 降低的概率图 (图 7), 1984—2007 年土壤酸化的概率主要分布在 0.4~0.8 之间, 位于平原的潮土区和砂姜黑土区土壤酸化发生的概率较大, 大部分为 0.6~0.8; 而褐土酸化概率较低, 为 0.4~0.6; 位于地形较高部位黄土母质褐土分布区的酸化概率则低于 0.2。2007—2017 年土壤酸化概率整体降低, 主要分布在 0.2~0.6 之间; 其中潮土区

已大部分降低为 0.2~0.4。图 8 是按栅格计算的所有位置土壤 pH 变化值与对应的累积频率, 计算 1000 次的结果高度重合 (图中曲线实际为 1000 条), 说明每次随机相减对酸化面积的判断都高度近似, 该图表明 1984—2007 年占总面积 59% 的土壤 pH 降低超过 0.1, 2007—2017 年则只有 32% 面积的土壤 pH 降低超过 0.1, 1984—2017 年间共有 50.0% 面积的耕地土壤 pH 降低超过 0.1。这与苏南 1980—2000, 2000—2015 两个阶段土壤 pH 下降面积不断扩大的规律明显不同^[13]。

图 8 说明了研究区土壤 pH 下降的总体情况, 但没有考虑判断土壤 pH 下降的置信度。为增加判断可靠性, 特设定土壤 pH 发生变化的临界概率 P_c , 用

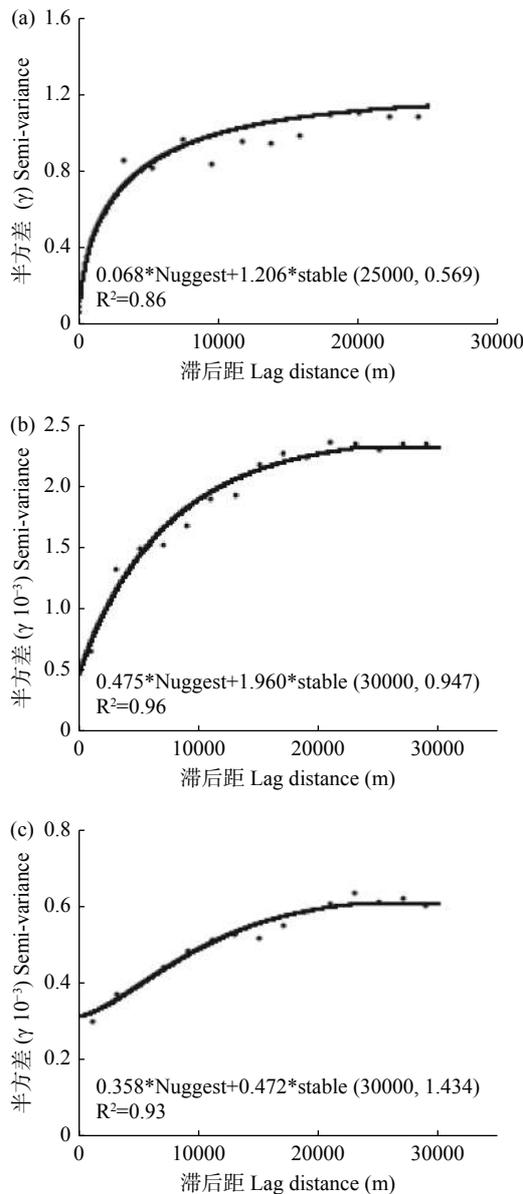


图 5 1984 年(a)、2007 年(b)和 2017 年(c)经数据正态变换后的半变异函数图

Fig.5 The semi-variogram in 1984 (a), 2007 (b) and 2017 (c) after data normalized transformed

Prob[pH 值变化量 ≥ 0.1 个单位] $\geq P_c$ 确认 pH 发生显著变化。P_c 值应大于 0.5, 且其值越大, 判断越可靠, 本研究将其设为 0.75。图 9 主要显示了土壤 pH 上升或下降 0.1 个单位的概率大于 0.75 的区域, 其中 1984—2007 年土壤显著酸化区域集中分布在许昌市东部和南部, 主要是潮土和砂姜黑土所在平原区, 面积约 1268 km², 耕地面积占比约 36.0%; 2007—2017 年土壤酸化得到有效控制和部分恢复, 但按 1984—2017 年比较, 仍有约 599 km² 的耕地达到显著酸化标准, 耕地面积占比约 17.0%。此外, 不同时期低山丘陵区黄土母质发育褐土 pH 有升高迹象,

且 2007—2017 年的 pH 升高概率 > 0.75 的面积较 1984—2007 年有扩大趋势, 与其周围土壤 pH 显著下降区形成鲜明对比。

3 土壤 pH 变化驱动因子讨论

3.1 土壤酸化及其恢复的主要原因

许昌市土壤 pH 变化的时空分异难以用土壤污染和大气沉解释。但其土壤前期显著酸化和后期又有所恢复的特征, 与 2007 年前后土壤管理方面的显著变化正相耦合。据许昌市农技站调查, 1984 年耕地化肥的实物用量为 570 kg hm⁻², 2007 年达 1750 kg hm⁻², 且愈到后期, 高浓度化肥比例越高^[26], 鉴于华北酸雨现象不明显, 且氮沉降不足施氮量的 1/5, 化肥氮的过量施用是土壤酸化的主要原因^[5, 20]。近 10 年来推广配方施肥和化肥零增长计划, 据 2005—2011 年对 1085 个农户的调查, 小麦平均施氮、磷、钾折纯量分别为 165 kg hm⁻²、102 kg hm⁻²、63 kg hm⁻²; 玉米分别为 155 kg hm⁻²、72 kg hm⁻²、48 kg hm⁻²^[26]。配方施肥并没有显著降低总化肥用量, 但显著降低了大田氮肥用量、增加了磷钾用量, 施肥配比趋于合理^[27-28], 使化肥总量不增加的同时粮食产量稳定增长。过量氮肥的硝化是土壤产生 H⁺ 的重要机制, 配方施肥使氮利用率提高, 无疑也使土壤酸化压力得到缓解^[27, 29-31]。自 2005 年以来, 许昌很快普及秸秆还田, 秸秆还田率在 2008、2011、2017 年分别为 30%、85% 和 96%^[26]。作物根系泵出大量的 H⁺ 以维持吸收阳离子后的土壤电荷平衡是土壤酸化的另一机制, 而秸秆还田对补偿土壤碱基阳离子损失具有重要意义, 可以有效提高土壤的缓冲性能、调节土壤 pH^[1, 29]。2007—2017 年许昌土壤有机质含量升高 (556 个采样点均值从 15.3 ± 3.5 g kg⁻¹ 增加到 19.6 ± 5.3 g kg⁻¹), 也有利于提高土壤吸附 H⁺ 能力。综上, 虽然没有对不同措施下土壤质子平衡进行长期试验观测, 但仍可肯定土壤 pH 宏观格局发生变化的现象与上述大范围 and 普遍性的土壤管理措施变革具有密切联系。

3.2 典型区土壤 pH 上升的主要原因

中低山褐土土壤 pH 的升高和其周边区域土壤酸化形成鲜明对比。对比图 9 与图 1c 发现, 褐土 pH 升高区域土壤母质以离石午城黄土为主, 仅少部分马兰黄土; 按沉积规律马兰黄土应覆盖在离石午城黄土之上, 马兰黄土的缺失是土壤遭受侵蚀的标志。

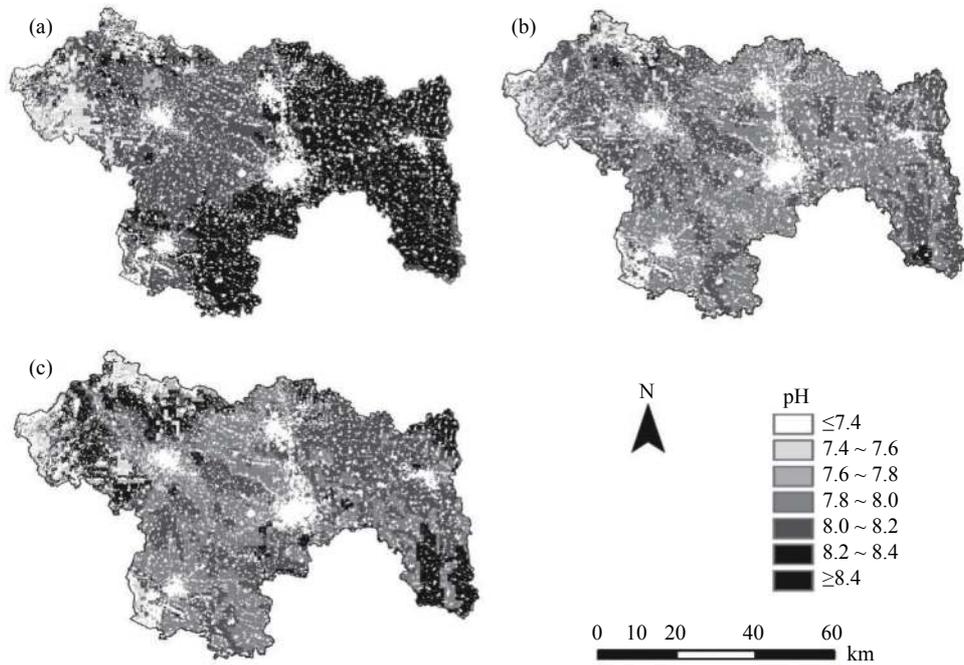


图 6 1984(a)年、2007(b)年和 2017(c)年土壤 pH 值空间分布图
 Fig.6 Maps of soil pH in 1984 (a), 2007(b) and 2017 (c)

根据 2007 年在黄土分布典型区进行密集采样的研究结果 (图 10), 60 个样本中 40 个样本 20~40 cm 土壤 pH 高于 0~20 cm, 最大差异为 1.08; 其余 20 个样本结果相反, 最大差异仅 0.2。成对样本检验 $P < 0.01$, 说明该区域 20~40 cm 土壤 pH 总体上高于 0~20 cm。1984—2007 年与 2007—2017 年两个时期的数据比较均表明该区域 pH 升高, 可排除样本化

验误差原因导致的升高误判。半干旱地区低山丘陵分布的黄土母质土壤富含钙, 并随降雨下渗在一定深度富集是一个显著特征。按系统分类, 该区土壤主要可归属普通钙积干润淋溶土土族, 据《中国土系志·河南卷》记载的该土族 6 个剖面, 亚表层土壤 pH 全部大于表层^[32], 与本区化验结果一致。由于土壤 pH 升高的区域明显集中在黄土覆盖的低山丘陵区,

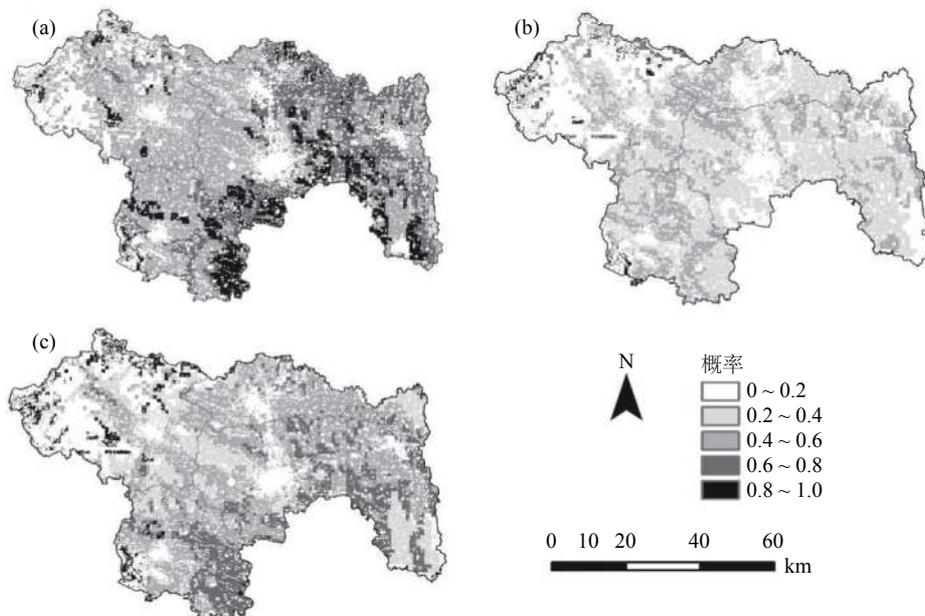


图 7 1984—2007(a)年、2007—2017 年(b)和 1984—2017(c)年期间土壤 pH 降低的概率图
 Fig.7 Probability maps of decreases in soil pH during the periods of 1984—2007 (a), 2007—2017 (b) and 1984—2017 (c)

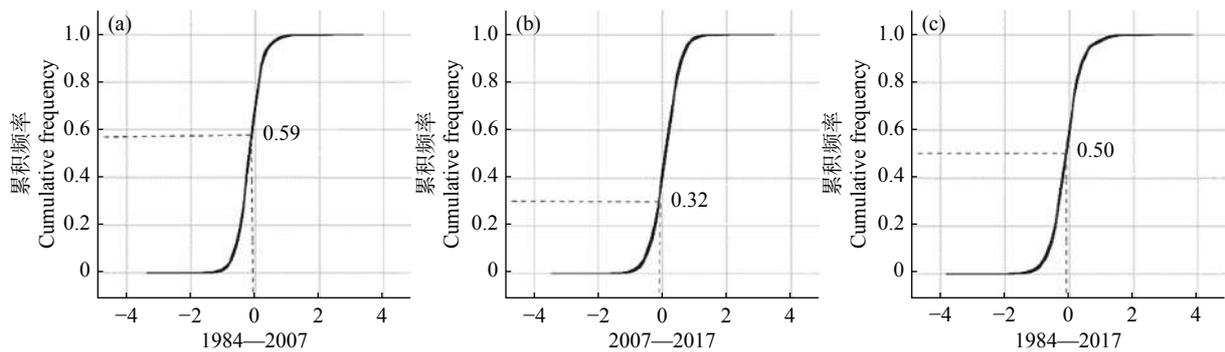


图 8 1984—2007 年、2007—2017 年和 1984—2017 年 pH 变化的累积频率曲线(基于模拟 pH 值的随机相减)

Fig.8 Cumulative frequency curves of pH changes during the periods of 1984—2007, 2007—2017 and 1984—2017 (based on random substraction of simulated pH values)

其 pH 变化趋势又与邻近的地形部位较低的洪积母质褐土的 pH 变化趋势形成明显反差, 而其土壤管理措施则类同。由此我们推断两者 pH 变化特点的反差主要归因于其立地环境的不同, 黄土母质褐土 pH 升高及升高区域逐渐扩大的特征与土壤侵蚀发生和发展存在关联。

3.3 不同土壤类型 pH 动态变化差异性及其原因

不同土壤类型酸化特征及其对土壤管理改变后的反馈效应明显不同(图 11)。研究区土壤 pH 整体仍在中性以上, 土壤 pH 下降应主要是交换性 H^+ 浓度增加所致, 而与交换性 Al 关系不大^[1]。潮土和砂姜黑土初始(1984 年) pH 分别是 8.24、8.23 高于

褐土(非黄土母质区)的 8.11。初始 pH 高, 说明土壤可交换性酸含量低, 在同样 H^+ 增加量条件下, 其 pH 下降也快。潮土和砂姜黑土在 1984-2007 年期间 pH 平均下降幅度分别为 0.17、0.13, 大于褐土的 0.11, 且 pH 显著下降区域以潮土和砂姜黑土为主(图 9a), 可以由其初始 pH 值不同解释。

在 2007—2017 年, 潮土的酸化趋势得到明显控制并有所恢复, 非黄土母质区褐土的酸化明显减缓, 唯砂姜黑土继续下降。图 12a 表明, 上述差异与各土壤类型的质地差异有关: 潮土以壤土为主, 兼有部分砂土; 而褐土、砂姜黑土质地偏黏。由图 12b, 砂土和壤土酸化后 pH 可恢复性强, 而黏壤土、壤黏土

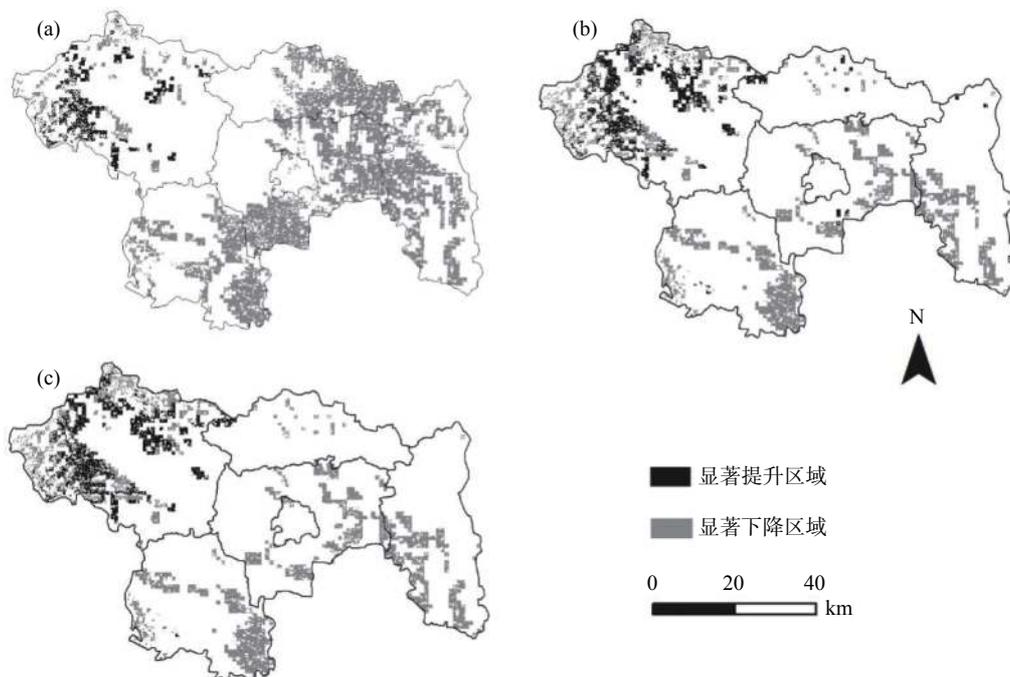


图 9 1984—2007 年(a)、2007—2017 年(b)年和 1984—2017 年(c)土壤 pH 变化概率 > 0.75 区域的空间分布图

Fig.9 The spatial distribution map of areas where the critical probability of pH change above 0.75 during the periods of 1984—2007 (a), 2007—2017 (b) and 1984—2017 (c)

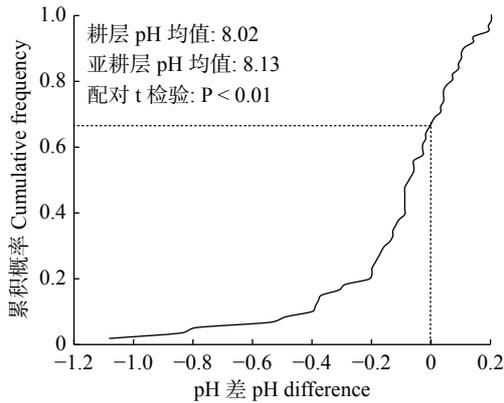


图 10 离石、午城黄土区上下层土壤 pH 差值累积概率分布图
Fig.10 Cumulative probability distribution of pH difference between surface and subsurface soil layers in the areas dominated by Lishi loess and Wucheng loess

和粉砂黏土 pH 可恢复性差。这应与不同质地土壤对酸的缓冲力有关, 砂土阳离子交换性能低, 酸化过程中产生的交换性 H⁺被土壤吸附的量较低, 而土壤溶液中 H⁺易增加, 因此 pH 值易于降低, 但由于土壤总 H⁺量低, 土壤 pH 亦易于恢复; 反之, 黏质土壤 pH 降低后恢复慢。

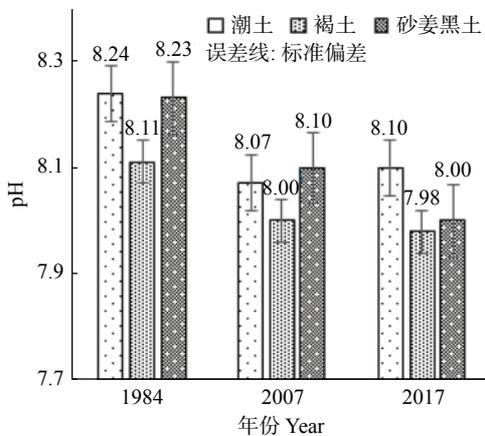


图 11 不同土类土壤 pH 值变化(不包括黄土母质褐土)
Fig.11 Changes of pH values in different soil types (Cinnamon soil derived from loess is not included)

目前褐土 pH 均值为 7.98, 酸化速度明显减缓; 砂姜黑土 pH 虽在 1984—2017 持续降低, 但当前为 8.0, 与褐土相当。是否秸秆还田和配方施肥能使北方偏碱性的黏土和壤土 pH 维持在 8.0 左右, 尚待继续观测和分析。但 2017 年局部最小土壤 pH 为 6.4, 说明局部土壤酸化的风险仍存在。

4 结论

1984—2017 年许昌市农田土壤 pH 大部区域下降, 小部区域升高。分阶段看, 1984—2007 发生酸

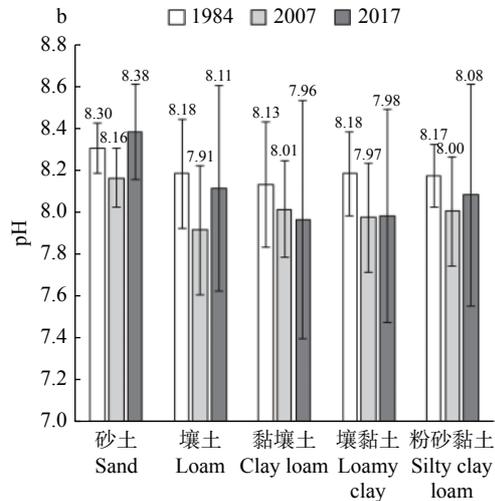
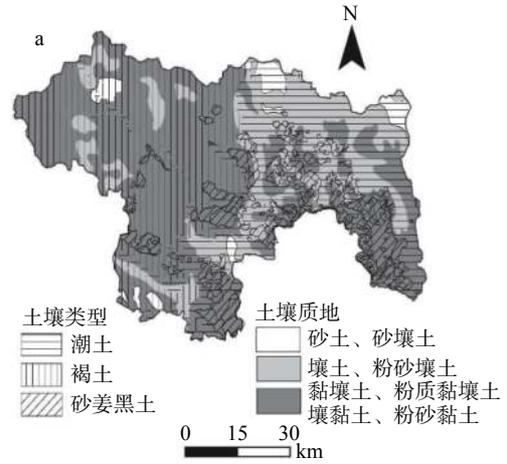


图 12 许昌土壤质地分布图(a)与不同质地类型土壤的 pH 变化(b)
Fig.12 Soil texture map (a) and soil pH varied with textures (b)

化的面积最大, 2007—2017 酸化现象明显缓和。该变化特征与 1984 年—2005 年化肥用量持续增长和 2005 年后大力推行秸秆还田和配方施肥的土壤管理转变相契合。潮土、褐土、砂姜黑土 pH 变化对土壤管理措施改变的反馈不同, 主要与其土壤质地、初始 pH 值差异有关。其中黄泛平原的潮土和平原山地交接区的洪冲积母质褐土的酸化现象明显缓解, 而砂姜黑土酸化仍有继续发展趋势。土壤 pH 升高区域主要发生在山地丘陵黄土母质褐土分布区, 1984—2007 以及 2007—2017 年两个阶段 pH 上升概率 > 0.75 的面积在扩大, 该现象可能与土壤侵蚀有关。建议许昌市及华北同类型农区综合考虑上述土壤特性及地形、母质等进行分类治理。

参考文献:

[1] Weil R R, Brady N C. The nature and properties of soils (15th

- edition)[M]. Pearson Press, 2017.
- [2] Hu X J, Liu J J, Wei D, et al. Soil bacterial communities under different long-term fertilization regimes in three locations across the black soil region of northeast China[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(05): 751 – 763.
- [3] Yu Z, Chen H Y H, Searle E B, et al. Whole soil acidification and base cation reduction across subtropical China[J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114107.
- [4] Zhang X, Guo J, Vogt R D, et al. Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major Chinese croplands[J]. *Geoderma*, 2020, 366: 114234.
- [5] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327: 1008 – 1010.
- [6] Yang Y, Ji C, Ma W, et al. Significant soil acidification across northern China's grasslands during 1980s –2000s[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 2292 – 2300.
- [7] 郑超, 郭治兴, 袁宇志, 等. 广东省不同区域农田土壤酸化时空变化及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 593 – 601.
- [8] Guo X, Li H Y, Yu H M, et al. Drivers of spatio-temporal changes in paddy soil pH in Jiangxi Province, China from 1980 to 2010[J]. *Scientific reports*, 2018, 8: 2702.
- [9] Li Q, Li A, Yu X, et al. Soil acidification of the soil profile across Chengdu Plain of China from the 1980s to 2010s[J]. *The Science of the total environment*, 2020, 698: 134320.
- [10] 张驭航, 李玲, 王秀丽, 等. 河南省土壤pH值时空变化特征分析[J]. *土壤通报*, 2019, 50(5): 1091 – 1100.
- [11] 李涛, 于蕾, 万广华, 等. 近30年山东省耕地土壤pH时空变化特征及影响因素[J]. *土壤学报*, 2020, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20200518.1057.006.html>.
- [12] Li Q, Li S, Xiao Y, et al. Soil acidification and its influencing factors in the purple hilly area of southwest China from 1981 to 2012[J]. *Catena*, 2019, 175: 278 – 285.
- [13] Xie E, Zhao Y, Li H, et al. Spatio-temporal changes of cropland soil pH in a rapidly industrializing region in the Yangtze River Delta of China, 1980 –2015[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2019, 272: 95 – 104.
- [14] Meng H Q, Xu M G, LÜ J L, et al. Soil pH dynamics and nitrogen transformations under long-term chemical fertilization in four typical Chinese croplands[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(11): 2092 – 2102.
- [15] Zeng M F, De Vries W, Bonten L T C, et al. Model-based analysis of the long-term effects of fertilization management on cropland soil acidification[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(7): 3843 – 3851.
- [16] Zhu Q, Vries W D, Liu X, et al. The contribution of atmospheric deposition and forest harvesting to forest soil acidification in China since 1980[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 146: 215 – 222.
- [17] Cai J, Luo W, Liu H, et al. Precipitation-mediated responses of soil acid buffering capacity to long-term nitrogen addition in a semi-arid grassland[J]. *Atmospheric Environment*, 2017: 312 – 318.
- [18] Zhang Y, De Vries W, Thomas B W, et al. Impacts of long-term nitrogen fertilization on acid buffering rates and mechanisms of a slightly calcareous clay soil[J]. *Geoderma*, 2017, 305: 92 – 99.
- [19] Zhu Q, Liu X, Hao T, et al. Modeling soil acidification in typical Chinese cropping systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613-614: 1339 – 1348.
- [20] Cui L, Liang J, Fu H, et al. The contributions of socioeconomic and natural factors to the acid deposition over China[J]. *Chemosphere*, 2020, 253: 126491.
- [21] Filippi P, Cattle S R, Bishop T F A, et al. Digital soil monitoring of top- and sub-soil pH with bivariate linear mixed models[J]. *Geoderma*, 2018, 322: 149 – 162.
- [22] Ou Y, Rousseau AN, Wang L, et al. Spatio-temporal patterns of soil organic carbon and pH in relation to environmental factors - A case study of the black soil region of northeastern China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2017, 245: 22 – 31.
- [23] Gray J M, Bishop T F A, Wilford J R. Lithology and soil relationships for soil modelling and mapping[J]. *Catena*, 2016, 147: 429 – 440.
- [24] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 中国农业科技出版社, 北京, 1998.
- [25] 赵彦锋, 孙志英, 陈杰. kriging插值和序贯高斯条件模拟算法的对比分析[J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(6): 767 – 776.
- [26] 侯占领, 牛银霞. 许昌市耕地地力评价及主要作物适宜性评价研究[M]. 中国农业科学技术出版社, 2013.
- [27] 赵彦锋, 程道全, 巫振富, 等. 基于空间分析的河南省小麦施肥问题诊断与地理优化[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1206 – 1218.
- [28] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 802 – 817.
- [29] Fujii K, Hayakawa C, Panitkasate T, et al. Acidification and buffering mechanisms of tropical sandy soil in northeast Thailand[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 165: 80 – 87.
- [30] Yuan C, Mosley LM, Fitzpatrick R, et al. Organic matter addition can prevent acidification during oxidation of sandy hypersulfidic and hyposulfidic material: Effect of application form, rate and C/N ratio[J]. *Geoderma*, 2016, 276: 26 – 32.
- [31] 孟红旗, 吕家珑, 徐明岗, 等. 有机肥的碱性及其减缓土壤酸化的机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1159 – 1167.
- [32] 吴克宁, 李玲, 鞠兵, 等. 中国土系志: 河南卷[M]. 科学出版社, 2019.

Spatiotemporal Changes of Soil pH in Recent 35 years and Driving Factors in a Typical Agricultural Region of North China

WEI Xin-tao^{1,2}, ZHAO Yan-feng^{2*}, NIU Yin-xia³, HOU Zhan-ling³, LI Yi-xin², CHEN Jie²

(1. *School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*; 2. *School of Agricultural Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*; 3. *Station of Agricultural Technology Extension Service, Xuchang 461000, China*)

Abstract: The spatiotemporal changes of soil pH are of great significance in assessing the evolution of regional soil quality and function. The significant decline of soil pH during 1980 s—2010s in China has been reported by many papers, showing the overuse of chemical fertilizer was one of the important driving factors. To weaken the adverse effect of chemical fertilizer, straw returning to soil and formula fertilization started to be extensively implemented since 2005, which was an important change in soil management across the national scale. But the effects of them on soil pH changes had rarely been evaluated. In this paper, the changes of soil pH in a typical agricultural region of North China during the periods of 1984—2007 and 2007—2017 were investigated by means of sequential gaussian simulation based on 1287 soil samples. The results showed that soil acidification had taken place in the most of fluvo-aquic soil, non-loess derived cinnamon soil and Shajiang black soil during the period of 1984—2007. During the period of 2007—2017, the acidification of fluvo-aquic soil showed a trend of recovering because of straw returning and formula fertilization, no significant changes were in non-loess derived cinnamon soil, but a further decrease was in Shajiang black soil. The area dominated by loess-derived cinnamon soils showed an increase in soil pH in the both periods. It was found that the different effects of returning straw to the field and formula fertilization on easing soil acidification in different soil types could partly be attributed to their differences in texture and initial pH values. The soil pH increased in the loess area was related to the erosion of surface soil and the subsurface soil with higher pH value. In order to achieve better soil pH adjustment in North of China, in addition to insisting on the straw returning to soil and formula fertilization, more localized and optimized management strategies should be developed with considering the effects of soil category, soil texture, soil parent material and landform.

Key words: Soil pH; Straw returning to soil; Formula fertilization; Spatiotemporal changes of soil pH; Sequential gaussian simulation

[责任编辑: 孙福军]