

DOI: 10.11766/trxb201412060625

渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征*

于洋¹ 赵业婷¹ 常庆瑞^{1†}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 为充分了解渭北台塬区耕地土壤养分的时空变异特征, 以渭北台塬典型农业县——蒲城县为例, 基于该区1980年和2011年两个时期的实测样点速效养分数据, 采用传统统计学、地统计学结合GIS技术, 研究其耕地土壤碱解氮和有效磷的时空变异性、变化规律及其影响因素。结果表明, 1980—2011年, 该区土壤碱解氮、有效磷的块金系数增大, 空间相关距缩短, 标准化Z值降低, 空间结构性特征减弱, 随机因素作用增强。二者的平均含量分别提高84.32%、179.30%, 呈现出原低值区增速快、高值区增速慢或略有降低的趋势; 碱解氮/有效磷平均比值由7.22降至5.67, 高、低值区发生逆转, 氮磷失调问题得到改善, 但仍高于农作物适宜水平。人为活动如施肥、灌溉等是土壤速效养分时空变化的重要影响因素。

关键词 土壤; 碱解氮; 有效磷; 时空变异

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

土壤碱解氮(alkalytic nitrogen, AN)、有效磷(available phosphorus, AP)是植物生长所必需元素N、P的直接来源, 也是影响区域水体生态环境的重要因素, 其含量对土壤肥力的评价具有良好的表征作用^[1-3]。同时, 二者平衡影响着土壤肥力的积累, 若比例失调则导致土壤养分流失、农田生态系统破坏等环境问题^[4, 5]。因此, 揭示土壤速效养分及其比值的时空变化规律, 对于了解土壤的形成过程、结构和功能具有极其重要的意义^[6], 有助于加深对土壤发育格局及其与环境因子和生态过程关系的认识^[7], 同时也是精准农业中进行合理施肥和土壤养分管理的重要基础^[8-10]。

近年来, 一些学者进行了时间尺度上跨越20年左右的土壤养分时空变异特征研究, 大多集中在土壤养分含量丰富的平原地区^[10-17], 针对土壤养分贫瘠的台塬地区的研究相对较少。随着陕西省西咸新区的设立, 西安大都市圈的构建, 渭北台塬粮区势必成为陕西省农业生产与发展的战略要地。1980年第二次土壤普查至今已有30多年, 农户普遍重

视氮肥、磷肥的投入, 对土壤的改造规模与强度均在不断增大、增强, 土壤养分的分布状况势必发生改变^[18-20]。本文以位于渭北台塬区的国家级农业县——蒲城县为例, 基于1980年和2011年两个时期的土壤养分实测数据, 采用地统计学与GIS技术相结合的方法^[19-21], 研究该区耕地土壤碱解氮和有效磷的时空变异性特征, 变化规律, 养分平衡状况及其影响因素, 以期为区域农田生态平衡保护和测土配方施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

蒲城县隶属陕西省渭南市, 地理位置为109°20′16″E~109°54′55″E, 34°45′02″N~35°10′35″N东接澄城、大荔, 西连富平、铜川, 南临临渭, 北依白水。东西长52.60 km, 南北宽47.50 km, 土地总面积1 584 km²。属暖温带大陆性季风气候, 四季分明, 年平均日照时数为2 266 h,

* 国家高技术研究发展计划项目(863计划)(2013AA102401)、高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120204110013)和陕西省耕地地力调查与质量评价项目共同资助

† 通讯作者, 常庆瑞(1959—), 男, 教授, 主要从事土地资源与空间信息技术研究。E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 于洋(1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土地资源与空间信息技术。E-mail: tyhj091@163.com

收稿日期: 2014-12-06; 收到修改稿日期: 2015-05-16

年均气温13.62 ℃, 无霜期211 d, 年均降水量550 mm。地势西北高、东南低, 海拔345~1 282 m。地貌类型以台原为主, 分为南部平原区(345~400 m)、中部台塬区(400~600 m)、北部山原区

(>600 m)。耕种土壤主要有壤土、黄绵土和淤土。土地利用以耕地为主, 土地垦殖率达60%, 主要种植作物为小麦、玉米, 其夏粮播种面积居陕西省首位^[22]。

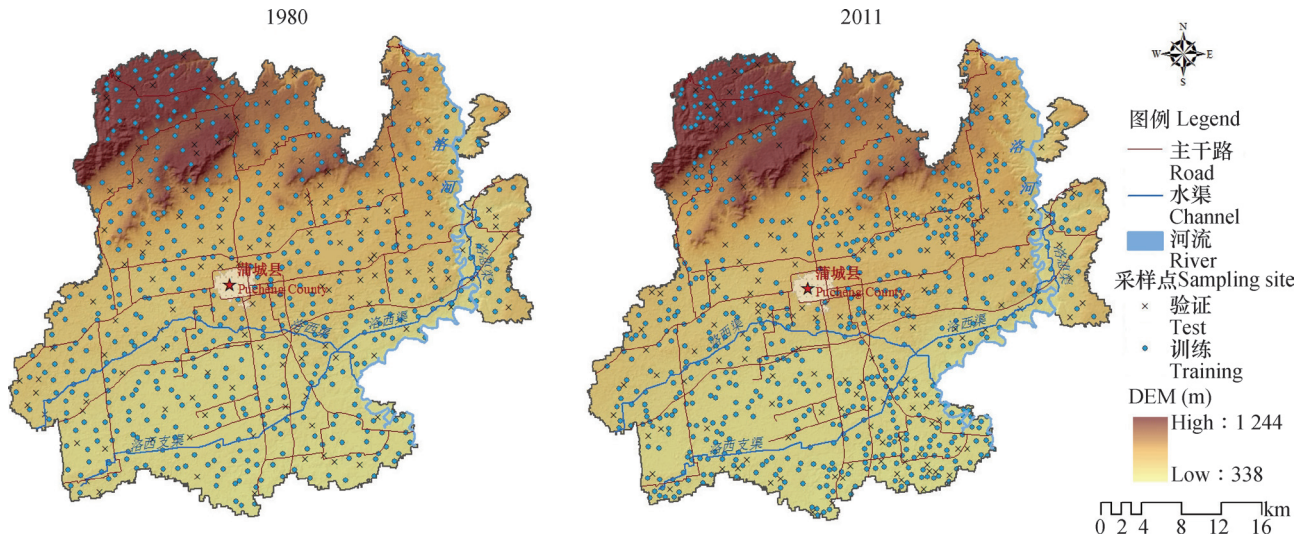


图1 蒲城县地形和土壤采集点分布图

Fig.1 Map of DEM and soil sampling sites in Pucheng County

1.2 土壤样品采集与测定

本研究收集了蒲城县两个时期(1980和2011)的耕地土壤碱解氮、有效磷养分数据。1980年样点数据主要根据20世纪80年代蒲城县第二次土壤普查文字记载, 结合土壤图、行政区划图等资料获取; 2011年数据为陕西省耕地地力调查与质量评价、测土配方施肥项目在2011年采样、分析获取的样点数据。为提高两个时期土壤养分时空变异性分析的科学性、可比性与客观性, 以2011年耕地分布图为标准, 获取1980年样点数据782个、2011年采样点数据871个。1980年和2011年采样方法一致, 均以全面性、均匀性、客观性和可比性(1980)为原则, 并根据地块面积、种植制度、产量水平等因素确定采样单元, 根据单元的形状、大小确定适当的布点方法, 长方形地块采用“S”法, 近似正方形地块采用“X”法或棋盘形布点^[22], 各个采样点取样深度为0~20 cm土层, 混匀后用四分法留取1 kg土样装袋以备分析; 土壤样品采用常规测定方法: 土壤碱解氮采用1 mol L⁻¹ NaOH扩散法测定, 土壤有效磷采用0.5 mol L⁻¹ NaHCO₃浸提-磷钼蓝比色法测定^[23]。

1.3 数据预处理

本研究采用域值法结合邻近点比较法进行异常

值剔除, 保留1980年采样点数据760个、2011年采样点数据859个。随机抽取各原始样本集中80%的样点数据(训练样本)用于插值分析, 余下20%的样点数据(验证样本)进行插值精度检验。

对异常值剔除后的有效样本数据进行K-S检验, 发现原始数据均具有左偏态效应, 不符合正态分布。经Box-Cox转换后, 符合或基本符合正态分布, 满足空间克里格法应用的前提条件。

1.4 半方差函数分析与分维数计算

半方差函数是地统计学分析的特有函数, 克里格插值的基础。假设区域化变量 $Z(x)$ 满足二阶平稳, 则半变异函数可以具体表示为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

式中, $r(h)$ 为半方差函数; h 为样点空间间隔; $N(h)$ 为间隔距离为 h 的样点数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别为区域化变量 $Z(x)$ 在空间位置 x_i 和 x_i+h 的实测值^[24]。

分维数(Fractal Dimension, FD)是一个无量纲数, 可以通过比较不同变量的FD值来衡量变量间的空间异质性程度强弱。FD计算公式如下^[25]:

$$FD = 2 - H, H = \frac{1}{2} \log r(h) \propto \log(h) \quad (2)$$

式中, H 为 $\log r(h)$ 和 $\log(h)$ 在尺度 h 范围内线性回归的直线斜率, 取值范围为 $0 \sim 1$ 。分维数 FD 取值范围 $(1, 2]$, 其可对不同变量进行比较, 衡量其空间异质性程度大小。 $FD=2$ 时, 表明半方差函数为随机型, 变量不存在空间相关性; FD 值越大, 人为因子引起的随机变异所占比例越大; 反之, 结构因子引起的系统变异所占比例越大^[13, 26]。

1.5 空间自相关分析

空间自相关性是指研究对象的属性值在空间位置上的相关性。全局Moran's I 是表述空间相关性的常用参数之一, 其计算公式如下

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n w_{i,j} (x_i + \bar{x})(x_j + \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n w_{i,j}} \quad (3)$$

式中, n 是变量 x_i 的样本数, x_i 和 x_j 是位置 i 和 j 的样本实测值, S^2 是其方差, \bar{x} 是平均值, $w_{i,j}$ 是对称二项分布空间权重矩阵。通常将 I 标准化为 Z , 统计的 Z_i 得分按以下形式计算:

$$Z_i = \frac{1 - E[I]}{\sqrt{V[I]}} \quad (4)$$

全局Moran's I 指数计算的是协方差, 能够对空间相关显著性及正负性提供统计学检验。半方差函数分析法计算的是方差, 没有区分正负两种相关性, 但其能够为空间插值提供科学依据。只有将二者结合分析才更加真实有效^[13, 22]。

2 结果与讨论

2.1 土壤碱解氮与有效磷的基本特征与动态变化

1980年蒲城县耕地土壤碱解氮、有效磷的平均含量分别为40.75、6.86 mg kg⁻¹, 均处于陕西省第二次土壤普查时期土壤养分分级标准的第6级(30~45、5~10 mg kg⁻¹), 平均碱解氮/有效磷比值为7.21; 2011年碱解氮、有效磷的平均含量分别为75.11、19.16 mg kg⁻¹, 均处于陕西省第二次土壤普查时期土壤养分分级标准的第4级(60~90、15~20 mg kg⁻¹), 平均碱解氮/有效磷比值为5.60。两个时期土壤养分的变异系数介于35%~77%间, 均属中等变异强度^[12]; 变异系数由大到小均表现为有效磷>碱解氮/有效磷比值>碱解氮。

两个时期的土壤养分含量间具有显著性差异($p < 0.05$), 土壤碱解氮、有效磷的平均含量分别提高了84.32%、179.3%, 碱解氮/有效磷比值则随之显著降低, 下降了22.33%(表1)。30年来, 各养分指标的变异系数均在提高, 其中土壤有效磷的变异系数增幅最大, 提高了15.21%, 碱解氮提高了1.48%。可见, 30年来蒲城县耕地土壤碱解氮和有效磷的含量显著提高, 极值跨度增大, 变异性增强。

本研究中各时期所选取的训练样本、验证样本与其总体样本数据具有相似的统计特征, 空间分布均匀, 表明各项数据集具有良好的代表性。

2.2 土壤碱解氮与有效磷的时空变异性

蒲城县两个时期耕地土壤碱解氮、有效磷的最优半方差函数及其参数见表2。拟合精度中, 残差的标准差RSS接近于0, 决定系数 R_2 接近于1, 表明本研究拟合的各半方差函数能较好地反映各土壤养分的空间结构特征。2011年土壤碱解氮的半方差函数的最优理论模型为球状模型, 其余各指标的最优理论模型均为指数模型。两个时期的土壤有效磷及1980年土壤碱解氮的块金系数介于0.50~0.75, 表明其均具有中等程度的空间相关性^[27], 2011年土壤碱解氮的块金系数大于0.75, 表明其具有弱的空间相关性^[27]。2011年速效养分的块金系数均高于1980年速效养分块金系数, 空间相关距在缩小, 分维数明显增大, 表明30年来该区土壤养分的空间结构性特征减弱、相关性降低, 空间分布趋于破碎, 其空间变异特征更多的趋于发生在小尺度上。同时, 各养分的全局Moran's I 的标准化 Z 值均大于2.58, 表明二者均具有极显著的空间自相关性($p < 0.01$), 空间聚集特征明显^[24], 且2011年的标准化 Z 值均低于1980年, 表明30年来土壤碱解氮、有效磷的空间自相关性在减弱, 与半方差函数分析得到的规律一致。

2.3 土壤碱解氮与有效磷的时空变化格局

采用普通克里格插值方法, 分别绘制1980年和2011年两个时期的养分空间分布图, 并将同一时期的碱解氮与有效磷分布图进行空间叠加分析, 计算AN/AP比值, 获得碱解氮/有效磷比值空间分布图(图2)。由图2可以看出, 研究区两个时期土壤碱解氮、有效磷含量整体均呈南高北低的趋势, 但局部变异性强, 多呈镶嵌、团块状分布。1980年, 耕地土壤碱解氮丰缺状况主要处于“极缺乏”

表1 1980年和2011年蒲城县耕地土壤碱解氮、有效磷含量统计特征

Table 1 Statistics of contents of soil alkalytic N and available P in cultivated lands of Pucheng County in 1980 and 2011

项目Item	1980年 Year 1980					2011年 Year 2011				
	样本数 Number of samples	平均值 Mean (mg kg ⁻¹)	范围 Range (mg kg ⁻¹)	标准差 Std diversion	变异系 数CV (%)	样本数 Number of samples	平均值 Mean (mg kg ⁻¹)	范围 Range (mg kg ⁻¹)	标准差 Std diversion	变异系 数CV (%)
AN	760	40.75	10~155	15.16	37.20	859	75.11	18.10~209.00	29.05	38.68
AN-T	608	40.69	10~144	14.45	35.51	687	74.85	18.10~209.00	28.04	37.46
AN-S	152	41.07	16~155	17.77	43.26	172	76.14	27.80~197.20	32.87	43.17
AP	760	6.86	2~31	4.21	61.43	859	19.16	2.50~89.90	14.68	76.64
AP-T	608	6.87	2~31	4.18	60.91	687	19.18	2.50~89.90	15.02	78.28
AP-S	152	6.81	2~29	4.34	63.71	172	19.07	3.60~85.70	13.32	69.84
AN/AP	760	7.21	0.72~24	3.78	52.44	859	5.60	0.31~23.33	3.70	66.00
AN/AP-T	608	7.22	0.75~24	3.80	52.58	687	5.67	0.31~23.33	3.78	66.79
AN/AP-S	152	7.18	1.38~24	3.73	52.02	172	5.34	0.60~22.33	3.32	62.22

注: AN是碱解氮总体样本; AN-T是两个时期碱解氮的训练样本; AN-S是两个时期碱解氮验证样本(AP, AN/AP同理) Note: AN stands for alkalytic nitrogen of the total samples; AN-T for alkalytic nitrogen of the training samples; AN-S stands for alkalytic nitrogen of the test samples (for AP, AN/AP the same as the above)

表2 蒲城县两期耕地土壤碱解氮、有效磷最优半方差函数模型及其参数

Table 2 Optimal semivariogram models and their parameters for soil AN and AP in cultivated land of Pucheng County during the two different periods

时期 Period	指标 Item	模型 Model	块金值 C ₀	基台值 C ₀ +C	变程 A (m)	块金系数 C ₀ /(C ₀ +C)	残差平方和 RSS	决定系数 R ²	Moran's I	标准化 Z	分维数 FD
1980	AN	指数 E	0.048	0.084	5 600	0.571	7.39 × 10 ⁻⁵	0.886	0.220	14.98	1.941
	AP	指数 E	0.021	0.035	5 500	0.600	3.55 × 10 ⁻⁶	0.967	0.113	7.763	1.951
2011	AN	球状 S	0.290	0.371	1 750	0.782	5.30 × 10 ⁻⁴	0.624	0.125	6.457	1.994
	AP	指数 E	0.155	0.237	5 200	0.654	6.68 × 10 ⁻⁴	0.786	0.145	7.441	1.962

水平, 所占耕地面积为87.89%; 耕地土壤有效磷丰缺状况主要处于“缺乏”水平, 所占耕地面积为87.22%。经过30年的发展, 土壤速效养分含量明显提高。2011年土壤碱解氮、有效磷含量均主要处于“丰富”水平, 面积比重分别达到45.36%、57.11%。由图3可知, 养分变化量与初始值之间呈极显著负相关($p < 0.01$), 原低值区土壤养分增速快, 原高值区土壤养分增速较慢或略有下降, 土壤养分的初始值明显影响其空间格局及其演变规律。

20世纪80年代碱解氮含量在中部台塬区整体较为匮乏, 经过30年的发展得到了明显的改善, 39.32%的耕地土壤碱解氮提高了30~40 mg kg⁻¹, 24.87%的耕地土壤碱解氮提高了40 mg kg⁻¹以上;

1980年土壤碱解氮含量较高的西北部上王镇、西南部原任乡和洛河流域的龙阳镇增速较慢, 30年来提高了不到20 mg kg⁻¹。

研究区1980年土壤有效磷含量普遍较低, 2011年土壤有效磷的平均含量为1980年的2.79倍, 92.07%的耕地土壤有效磷含量增幅超高5 mg kg⁻¹, 其中增幅范围介于5~15 mg kg⁻¹之间的土壤占到了耕地总面积的75.57%, 16.50%的耕地土壤有效磷含量增幅超过15 mg kg⁻¹, 主要分布于南部平原地区。由于土壤有效磷含量增速明显高于碱解氮含量增速, 2011年碱解氮/有效磷比值较1980年明显降低, 平均值由7.21降低为5.60, 32.12%的耕地碱解氮/有效磷比值降低了2~4, 41.06%的耕地碱解氮

表3 蒲城县耕地土壤碱解氮、有效磷含量丰缺等级面积百分比

Table 3 Percentages of grades of cultivated land of Pucheng County (%) in abundance of soil AN and AP

等级 Grade	范围 Range (mg kg ⁻¹)	面积比例 Percentage (%)		等级 Grade	范围 Range (mg kg ⁻¹)	面积比例 Percentage (%)	
		AN ₁₉₈₀	AN ₂₀₁₁			AP ₁₉₈₀	AP ₂₀₁₁
极丰富 Very high	> 80	—	21.30	极丰富 Very high	> 30	—	8.27
丰富 High	70 ~ 80	—	45.36	丰富 High	20 ~ 30	—	57.11
中等 Medium	60 ~ 70	1.23	28.06	中等 Medium	15 ~ 20	3.14	31.93
缺乏 Low	50 ~ 60	10.89	5.28	缺乏 Low	10 ~ 15	87.22	2.69
极缺乏 Very low	< 50	87.89	—	极缺乏 Very low	< 10	9.64	—

注：丰缺指标来源于蒲城县“3414”田间肥效试验结果 Note: The abundance indices are sourced from the "3414" fertilization field experiment in Pucheng County

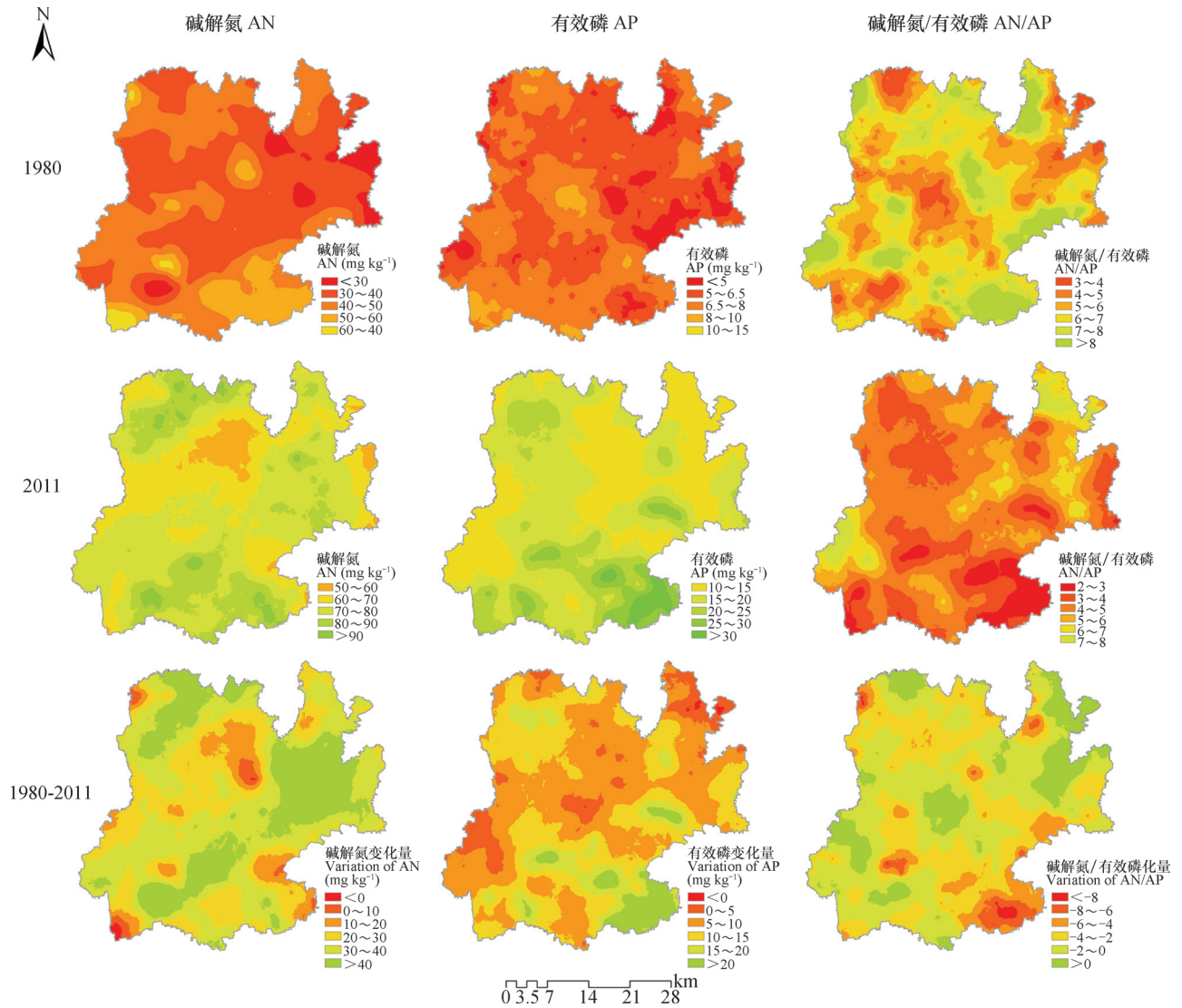


图2 蒲城县土壤速效养分时空变化分布图

Fig.2 Spatio-temporal variation maps of soil readily available nutrients in Pucheng County

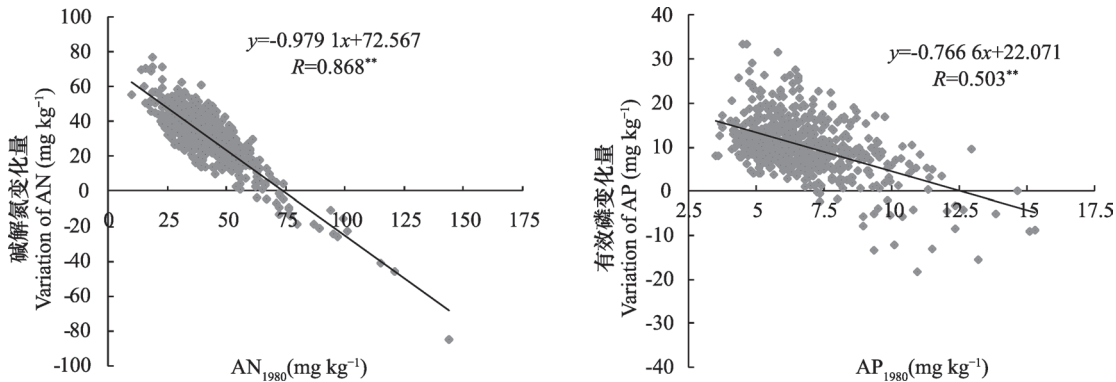


图3 蒲城县1980—2011年土壤速效养分变化量与1980年土壤速效养分含量之间的关系

Fig.3 Relationships between contents of soil readily available nutrients in 1980 and variation of the contents during the 30 years (1980—2011)

/有效磷比值降低了0~2, 碱解氮/有效磷比值更趋于合理化; 位于东北部的洛滨镇、东陈镇80年代碱解氮/有效磷比值低, 东南部的龙池乡碱解氮/有效磷比值失调严重, 而30年后高低值区发生逆转。这说明氮磷平衡问题得到人们的重视, 在耕作过程中更加注重合理施肥, 以提高肥料利用率。

2.4 影响速效养分含量时空变化的因素

为充分了解研究区土壤养分时空变化的影响因素, 进一步结合土壤类型、地貌类型、土地利用方式等环境变量, 分析其对土壤碱解氮和有效磷时空分布的影响(表4~表5)。

2.4.1 自然因素 土壤类型是影响土壤碱解氮、有效磷含量空间变异特征的重要因素之一。两个时期不同土壤类型上碱解氮、有效磷含量均表现为壤土>淤土>黄绵土。农田耕作管理措施不同以及不同土壤类型之间成土过程和发育程度不同是造成不同土壤类型碱解氮、有效磷含量差异的主要原因^[28]。在增大施肥和不断进行土壤改良的条件下, 位于不同土壤类型上的碱解氮、有效磷含量均有明显提高, 其中碱解氮含量增幅最大的是黄绵土, 提高了71.36%, 有效磷含量增幅最大的是壤土, 提高了112.23%。

地形地貌方面, 两个时期土壤碱解氮、有效磷与坡度、海拔之间呈极显著的负相关关系($p < 0.01$), 含量整体随地势的升高、坡度的增大而下降, 其中2010年土壤养分与海拔、坡度的相关性较强, 表明地理区位导向作用更为明显; 除1980年有效磷外, 余下养分在不同地貌类型之间存在显著性差异($p < 0.05$)。两个时期的土壤有效磷均表现为南部平原区>中部台塬区>北部山原区。然

而, 不同时期的碱解氮在地貌分区表现并不一致, 1980年土壤碱解氮含量为南部平原区>北部山原区>中部台塬区, 2011年则为南部平原区>中部台塬区>北部山原区, 此结果与赵业婷等^[22]的研究结果相一致。中、北部地貌类型间的含量趋势发生逆转的主要原因在于中部台塬区为县城所在地, 该区地势平坦, 交通便利, 农田设施齐全, 施肥投入大, 有助于碱解氮、有效磷的积累。

2.4.2 人为因素 2011年耕地土壤碱解氮、有效磷含量与其他土壤养分的相关性较1980年有所降低, 但其与距水系渠道的距离的相关性得以显著提高(表5)。由速效养分的时空分布图结合水系渠道的分布可看出水系渠道附近的区域土壤碱解氮、有效磷的增幅较大。土地利用方式是影响土壤碱解氮、有效磷含量空间变异特征的重要因素, 水浇地中的土壤养分含量显著高于旱地($p < 0.05$)(表4)。分析认为, 水浇地自身灌溉能力良好, 具有高投入、高产出的特性。随着生产技术的提高, 农户逐渐意识到这一问题, 他们具有更强的意识对水浇地增施有机肥、复合肥, 并进行精耕细作。

30年来, 蒲城县针对土壤养分普遍缺乏、土壤质地不良、水土流失严重等问题, 在农业生产方面采取了许多措施, 如退耕还林还草, 合理施肥, 积极发展水利建设, 提高农业机械化水平等。由图5可知, 30年间农户不断增施有机肥和配施化肥, 氮肥折纯量呈现逐年升高的趋势。氮肥折纯量由1980年的 3.97 t km^{-2} 提高至 21.79 t km^{-2} , 增幅达449%, 磷肥折纯量由1980年的 0.76 t km^{-2} 提高至 8.61 t km^{-2} , 增强了土壤中碱解氮、有效磷含量的积累。30年来, 该区积极发展水利建设, 水利设施

表4 蒲城县不同土壤类型、地貌类型和土地利用方式对土壤碱解氮、有效磷的影响

Table 4 Soil AN and AP in cultivated land of Pucheng County relative to type of soil, type of landform and type of landuse (mg kg⁻¹)

项目 Item	AN ₁₉₈₀	AN ₂₀₁₁	AP ₁₉₈₀	AP ₂₀₁₁
土壤类型				
壤土	41.98 ± 0.86a	69.31 ± 0.84a	6.87 ± 0.24a	14.58 ± 0.36a
淤土	41.85 ± 1.13a	68.98 ± 1.26a	7.25 ± 0.49a	12.64 ± 0.50b
黄绵土	37.43 ± 0.90b	64.14 ± 1.07b	6.56 ± 0.24a	12.18 ± 0.40b
地貌类型				
北部山原区	40.99 ± 1.12b	59.41 ± 1.06c	6.24 ± 0.25a	10.41 ± 0.33c
中部台塬区	36.94 ± 0.69c	67.71 ± 0.76b	6.77 ± 0.23a	12.98 ± 0.33b
南部平原区	46.51 ± 1.05a	72.94 ± 1.18a	7.67 ± 0.37a	15.74 ± 0.42a
土地利用方式				
旱地	—	59.04 ± 0.95a	—	11.19 ± 0.33a
水浇地	—	70.95 ± 0.69b	—	14.18 ± 0.28b

注：平均值 ± 标准误。同列同一因素中不同小写字母表示差异达0.05显著水平 Note: Mean ± SE. Different lowercase letters mean significant difference at the 0.05 level

表5 蒲城县耕地土壤碱解氮、有效磷与环境变量间的相关性

Table 5 Correlations of soil AN and AP with environment variables in cultivated land of Pucheng County

项目 Item	有机质 OM	全氮 TN	速效钾 AK	坡度 Slope	海拔 Altitude	距水系渠道距离 Distance to river
AN1980	0.429**	0.532**	0.397**	-0.239**	-0.226**	-0.074*
AN2011	0.349**	0.425**	0.206**	-0.180**	-0.270**	-0.183**
AP1980	0.226**	0.173*	0.279**	-0.067	-0.085*	-0.090*
AP2011	0.031	0.128**	0.162**	-0.193**	-0.280**	-0.111**

注：**表示0.01水平上显著Note: ** stands for significant correlation at the 0.01 level

面积由原来的629.7km²增至1265 km²，因地制宜地建设排灌网络系统，化害为利，有效控制了水土流失，从而提高了土壤的保水保肥能力。农业机械方面，1980年农机总动力为14.74 × 10⁴ kw，2011年提高至48.02 × 10⁴ kw，机耕面积比例由37.80%提升至61.79%，机械化水平提高，机械收获后秸秆被翻埋至土壤中，其蕴含的高含量碳元素刺激了微生物的活性，使得土壤的肥力得到提高，同时秸秆矿化后的元素能够促进土壤氮元素的循环和矿化，进而提高氮素的有效性^[29]。

综合分析，30年来，人为活动模糊了自然因素的影响，降低了土壤有机质与养分间的相关性，而人为施肥力度及其侧重方向又增大了地形地貌、土壤类型间的分异，使得土壤养分与地形因子间的相关性增强。可见，灌溉条件、施肥等人为因素是

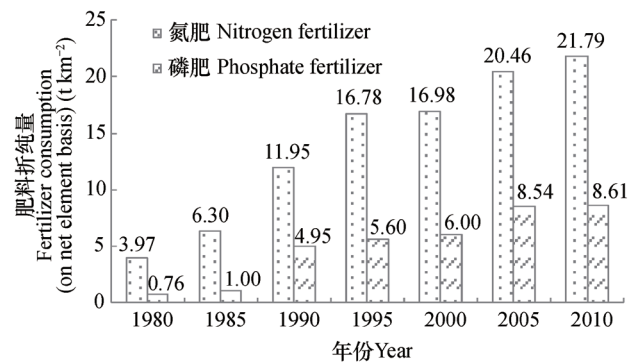


图4 1980—2010年蒲城县施肥折纯量变化图

Fig. 4 Variation diagram of fertilizer consumption (on net element basis) from 1980 to 2010 in cultivated land of Pucheng County

影响土壤碱解氮、有效磷含量时空变异特征的主要因素。

3 结 论

近30多年来,渭北台塬区蒲城县耕地土壤碱解氮、有效磷平均含量显著提高,分别增加84.32%、179.30%,碱解氮/有效磷比值降低了22.33%。30年来,土壤速效养分的块金系数增大,标准化Z值降低,分维数增大,空间结构性减弱,因此人为因素作用增强。两个时期土壤碱解氮、有效磷含量的空间分布均呈南高北低趋势,土壤养分的初始值显著影响其格局演变规律,表现出原低值区土壤养分增速快,原高值区增速慢或略有下降,其中东北部碱解氮含量增幅大,东南地区有效磷含量增幅大;同时,土壤碱解氮/有效磷比值高低比值区发生逆转,位于县域东南部的龙池乡碱解氮/有效磷比值严重失调问题得到一定程度缓解,磷平衡问题在农业生产中得到重视,农业施肥趋于合理。目前,蒲城县耕地土壤碱解氮、有效磷含量均主要处于“丰富”水平,但碱解氮/有效磷比值仍然高于作物适宜的比值。

参 考 文 献

- [1] 杨奇勇, 杨劲松, 刘广明. 土壤速效养分空间变异的尺度效应. 应用生态学报, 2011, 22 (2) : 431—436. Yang Q Y, Yang J S, Liu G M. Scale-dependency of spatial variability of soil available nutrients (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22 (2) : 431—436
- [2] 赵业婷, 李志鹏, 常庆瑞, 等. 西安市粮食主产区耕层土壤速效养分空间特征. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (6) : 1376—1385. Zhao Y T, Li Z P, Chang Q R, et al. Spatial characteristics of soil available nutrients in the major grain-producing region of Xi' an, China (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Sciences, 2013, 19 (6) : 1376—1385
- [3] 张凤荣. 土壤地理学. 北京: 中国农业出版社, 2002. Zhang F R. Soil geography (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2002
- [4] Cela S, Ketterings Q M, Czymmek K, et al. Characterization of nitrogen, phosphorus, and potassium mass balances of dairy farms in New York State. American Dairy Science Association, 2014, 97: 7614—7632
- [5] Spiess E. Nitrogen, phosphorus and potassium balances and cycles of Swiss agriculture from 1975 to 2008. Nutrient Cycle Agroecosystem, 2011, 91: 351—365
- [6] 范夫静, 宋同清, 黄国勤, 等. 西南峡谷型喀斯特坡地土壤养分的空间变异特征. 应用生态学报, 2014, 25 (1) : 92—98. Fan F J, Song T Q, Huang G Q, et al. Characteristics of spatial variation of soil nutrients in sloping field in a gorge karst region, southwest China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25 (1) : 92—98
- [7] 张伟, 刘淑娟, 叶莹莹, 等. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素. 农业工程学报, 2013, 29 (1) : 93—101. Zhang W, Liu S J, Ye Y Y, et al. Spatial variability of soil nutrients and influencing factors in typical karst virgin forest (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (1) : 93—101
- [8] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual Kriging. Soil Science, 1980, 31: 331—341
- [9] Franzen D W, Hofman V L, Halvorson A D, et al. Sampling for site-specific farming: Topography and nutrient considerations. Better Crops, 1996, 80 (3) : 14—18
- [10] 徐茂, 王绪奎, 顾祝军, 等. 江苏省环太湖地区速效磷和速效钾含量时空变化研究. 植物营养与肥料学报, 2007, 13 (6) : 983—990. Xu M, Wang X K, Gu Z J, et al. Spatial-temporal variation of soil available P and K in Taihu Lake region of Jiangsu Province, China (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13 (6) : 983—990
- [11] 肖鹏飞, 张世熔, 黄丽琴, 等. 成都平原区土壤速效磷时空变化特征. 水土保持学报, 2005, 19 (4) : 89—92. Xiao P F, Zhang S R, Huang L Q, et al. Temporal-spatial variability of soil available phosphorus in Chengdu Plain (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19 (4) : 89—92
- [12] 崔贝, 王纪华, 杨武德, 等. 冬小麦—夏玉米轮作区土壤养分时空变化特征. 中国农业科学, 2013, 46 (12) : 2471—2482. Cui B, Wang J H, Yang W D, et al. Analysis of temporal and spatial variation of soil nutrients in the winter wheat-summer maize rotation field (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46 (12) : 2471—2482
- [13] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异. 生态学报, 2013, 33 (2) : 554—564. Chen T, Chang Q R, Liu J, et al. Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable lands of Heyang County in South Loess Plateau (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (2) : 554—564
- [14] 赵业婷, 常庆瑞, 李志鹏, 等. 1983—2009年西安市

- 郊区耕地土壤有机质空间特征与变化. 农业工程学报, 2013, 29 (2): 132—140. Zhao Y T, Chang Q R, Li Z P, et al. Spatial characteristics and changes of soil organic matter for cultivated land in suburban area of Xi'an from 1983 to 2009 (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (2): 132—140
- [15] Liu X M, Zhang W W, Zhang M H, et al. Spatio-temporal variations of soil nutrients influenced by an altered land tenure system in China. Geoderma, 2009, 152: 23—34
- [16] 吕真真, 刘广明, 杨劲松, 等. 环渤海沿海区域土壤养分空间变异及分布格局. 土壤学报, 2014, 51 (5): 944—952. Lü Z Z, Liu G M, Yang J S, et al. Spatial variability and distribution pattern of soil nutrients in Bohai Coastal Area (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 (5): 944—952
- [17] 赵业婷, 齐雁冰, 常庆瑞, 等. 渭河平原县域农田土壤有机质时空变化特征. 土壤学报, 2013, 50 (5): 1048—1053. Zhao Y T, Qi Y B, Chang Q R, et al. Spatio-temporal variation of soil organic matter in farmland at a county scale in Weihe Plain (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (5): 1048—1053
- [18] 赵庚星, 李秀娟, 李涛, 等. 耕地不同利用方式下的土壤养分状况分析. 农业工程学报, 2005, 21 (10): 55—58. Zhao G X, Li X J, Li T, et al. Analysis of soil nutrient situation under different cultivated land use types (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21 (10): 55—58
- [19] Bogunovic I, Mesic M, Zgorelec Z, et al. Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil. Soil & Tillage Research, 2014, 144: 174—183
- [20] Corwin D L, Lesch S M, Shouse P J, et al. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. Agronomy Journal, 2003, 95: 352—364
- [21] Mueller T G, Hartsock N J, Stombaugh T S, et al. Soil electrical conductivity map variability in limestone soil overlain by loess. Agronomy Journal, 2003, 95: 496—507
- [22] 赵业婷, 常庆瑞, 李志鹏, 等. 渭北台塬区耕地土壤有机质与全氮空间特征. 农业机械学报, 2014, 45 (8): 140—148. Zhao Y T, Chang Q R, Li Z P, et al. Spatial characteristics of soil organic matter and total nitrogen in cultivated land of Weibei Tableland Area (In Chinese). Journal of Agricultural Machinery, 2014, 45 (8): 140—148
- [23] 于天仁, 王振权. 土壤分析化学. 北京: 科学出版社, 1988. Yu T R, Wang Z Q. Soil analytical chemistry (In Chinese). Beijing: Science Press, 1988
- [24] 刘庆, 夏江宝, 谢文军. 半方差函数与Moran's I在土壤微量元素空间分布研究中的应用——以寿光市为例. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36 (9): 1129—1133. Liu Q, Xia J B, Xie W J. Application of semi-variogram and Moran's I to spatial distribution of trace elements in soil: A case study in Shouguang County (In Chinese). Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36 (9): 1129—1133
- [25] Carr J R, Benzer W B. On the practice of estimating fractal dimension. Mathematical Geology, 1991, 23 (4): 945—958
- [26] Eghball B, Hergert G W, Lesoing G W, et al. Fractal analysis of spatial and temporal variability. Geoderma, 1999, 88 (3/4): 349—362
- [27] 张勇, 陈效民, 杜臻杰, 等. 典型红壤区田间尺度下土壤养分和水分的空间变异研究. 土壤通报, 2011, 42 (1): 7—12. Zhang Y, Chen X M, Du Z J, et al. Spatial variability of soil nutrients and water in the field-scale of typical red soil region (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42 (1): 7—12
- [28] 庞夙, 李廷轩, 王永东, 等. 土壤速效氮、磷、钾含量空间变异特征及其影响因子. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (1): 114—120. Pang S, Li T X, Wang Y D, et al. Spatial variability of soil available N, P and K and influencing factors (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15 (1): 114—120
- [29] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展. 中国生态农业学报, 2013, 21 (5): 526—535. Pan J L, Dai W A, Shang Z H, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21 (5): 526—535

SPATIAL-TEMPORAL VARIABILITY OF SOIL READILY AVAILABLE NUTRIENTS IN CULTIVATED LAND OF WEIBEI TABLELAND AREA

Yu Yang¹ Zhao Yeting¹ Chang Qingrui^{1†}

(¹ Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agro-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract In order to fully understand the spatio-temporal variability of soil available nutrients in cultivated lands of Weibei Tableland, measured data of soil readily available nutrient contents in cultivated lands of Pucheng, a typical agricultural county of Weibei Tableland, in 1980 and 2011 were gathered and analyzed, using traditional statistics and geo-statistics in combination with GIS technology for spatio-temporal variation of alkalytic nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and its affecting factors. Significant differences were found between the two years in content of soil nutrients ($p < 0.05$). In 2011, the average content of AN and AP was 75.11 mg kg^{-1} and $19.166 \text{ mg kg}^{-1}$, respectively, or 84.32% and 179.30% higher than their respective one in 1980, but the mean AN/AP was 5.60 in 2011, 22.33% lower than that in 1980, which indicates that their variation coefficients (CV) of the two periods ranged between 35% ~ 77%, and ranked moderate in intensity. However, CVs of the two soil nutrients both increased, with CV of AP in particular, the CV of AN increased by 1.48% and of AP by 15.21%. Obviously in the past 30 years the contents of soil AN and AP in the cultivated lands of Pucheng County increased significantly, with widened span between extremes and intensified variability.

The semi-variance function and fractal dimension (FD) analyses of the data show that the contents of AN and AP were higher in 2011 than in 1980 in nugget/sill ratio and in fractal dimension, but narrower in spatial correlation distance. Meanwhile, the spatial autocorrelation analysis reveals that the normalized Z scores of Global Moran's I of AN and AP were higher than 2.58, which indicates that the two were extremely significant in spatial autocorrelation ($p < 0.01$) and in spatial clustering. Nevertheless, the Z scores of AN and AP in 2011 were lower than those in 1980. The results of the above-mentioned analyses are quite consistent, indicating that in the past 30 years, the spatial structure features of AN and AP weakened and correlation lowered. Variation of soil nutrient contents is closely related to their initial values ($p < 0.01$). In soils low in initial value, soil available nutrient contents increased drastically, while in soils high in initial value they increased slowly or even decreased somewhat. Quite obviously, initial values of the soil nutrient contents influence their spatial distribution and evolution patterns. Meanwhile, regions high in AN/AP have turned into regions low in the ratio and vice versa. Though in areas the severe imbalance between AN and AP are corrected to a certain extent, they are still not suitable for cultivation.

Besides, impacts of geomorphic type, soil type, land use type, irrigation and fertilization on soil nutrient contents were analyzed. It was found that irrigation and fertilization were the main artificial factors affecting spatio-temporal variation of soil AN and AP. Human activities blurred the influence of natural factors and weakened the relationship between soil organic matter and other nutrients. Moreover, intensity and emphasis of artificial fertilization enhanced differentiation of landforms and soil types, thus intensifying the correlation between soil nutrient and geomorphic types. Therefore, excessive application of N and P

fertilizers and improvement of irrigation conditions contributes most to the increase in soil AN and AP. During the process of cultivation management, effective site specific measures should be taken in formula fertilization and soil quality management.

Key words Soil; Alkalytic nitrogen; Available phosphorus; Spatial-temporal variation

(责任编辑：檀满枝)