

焉耆盆地耕层土壤有效磷的时空变化特征及生态风险分析

范燕敏, 杨强军, 武红旗*, 董 通

(新疆农业大学资源与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要: 由于磷肥的过量施用, 使磷在土壤中富集, 存在对环境造成污染的潜在风险。通过对比 1980、2010 和 2020 年焉耆盆地耕层有效磷的含量变化, 分析土壤有效磷的时空富集特征, 利用相对生态风险系数对研究区进行环境风险分析。结果表明: 1980 ~ 2020 年间焉耆盆地耕地有效磷处于增加态势, 由中低水平升高到丰富水平, 有效磷含量提高了 2.66 倍, 年均增加 0.62 mg/kg, 博湖县年均增加量最高, 为 0.96 mg/kg。通过空间插值分析, 1980 年焉耆盆地耕层土壤有效磷含量以中等为主, 2010 年耕层土壤有效磷含量以较丰富为主, 2020 年耕层土壤有效磷含量以丰富为主, 博湖县、和静县、焉耆回族自治县耕层土壤有效磷呈现富集。根据 2020 年耕层土壤有效磷相对生态风险系数, 借助 ArcGIS 空间插值分析, 得到研究区耕地土壤有效磷环境生态风险区。焉耆盆地部分耕地土壤有效磷有潜在的生态风险, 合计面积为 1811.45 km², 占研究区耕地面积的 64.34%, 以中、低生态风险为主; 高风险面积很小, 仅占研究区耕地面积的 0.01%。各县耕地有效磷存在潜在风险的面积由大到小为: 和静县 > 焉耆回族自治县 > 博湖县 > 和硕县。因此, 针对焉耆盆地耕层有效磷富集特征, 为减少面源污染风险, 应对不同土壤磷环境风险采取区域养分管理策略, 减磷增效, 以促进环境保护。

关键词: 焉耆盆地; 耕地土壤; 有效磷; 时空变化; 生态风险

磷是作物生长必需的大量营养元素之一, 对作物生长发育和产量有着重要的影响, 由于多数土壤供磷不足以满足当季作物生长的需求, 施用磷肥成为提高作物产量的主要方式, 1994 年 Norman E. Borlaug 综合评价影响农业生产的各类因素后指出, 化肥对 20 世纪世界粮食产量增加有将近一半的贡献, 同时使全球农田土壤磷含量普遍上升 2 ~ 10 倍^[1]。施磷显著改善了土壤磷库水平并提高了土壤的供磷能力, 但磷肥的当季利用率一般只有 10% ~ 25%, 因此, 大量的磷被积累在土壤中, 积累超过一定限度后可能向水体迁移, 造成环境污染问题。詹秋丽等^[2]研究表明, 福建省 92.8% 的耕地有效磷处于富集状态。较全国第二次土壤普查, 太湖流域水旱轮作的农田土壤有效磷含量有了显著提高, 大部分农田土壤有效磷含量高于 20 mg/kg, 磷库处于盈余状态^[3]。果园和蔬菜地也存在磷肥投入过量现象, 导

致土壤有效磷含量大幅提高, 如西安市设施蔬菜地表层土壤有效磷含量平均为 159 mg/kg^[4]; 福建省平和县山地果园土壤磷平均含量 116.2 mg/kg, 59% 的果园土壤有效磷含量 >30 mg/kg, 存在磷环境风险^[5]。刘钦普^[6]对中国化肥施用强度时空变化进行研究后认为, 新疆是我国磷肥施用过量区之一。田力文等^[7]的研究表明, 1982 ~ 2011 年南疆阿克苏地区耕地土壤有效磷从 2.9 mg/kg 升高到 14.09 mg/kg, 有效磷含量处于高肥力 (>10 mg/kg) 的耕地占 67.41%, 因此, 该地区大部分土壤有效磷供给可满足作物需求, 若长时间过量施用磷肥则会在土壤中产生盈余而污染环境。新疆土壤属于石灰性土壤, 施入土壤中的磷素易被土壤中的钙镁等物质吸附或固定, 据分析 1979 ~ 2012 年, 新疆磷肥施用量从 8.3 kg/hm² 增加到 95.5 kg/hm², 磷肥增产效益却随年代推移而下降, 1981 ~ 2012 年磷肥利用率平均为 18.2%, 这不仅造成了磷肥的浪费, 也可能产生潜在的生态环境风险^[8]。

土壤磷存在空间异质性, 并且新疆土壤磷的本底值较低, 使焉耆盆地农业生产长期以来严重依赖化肥, 磷肥施用量较高^[9], 焉耆盆地作为新疆重要的农业生产基地, 拥有中国境内最大的淡水湖泊——博斯腾湖, 盆地环境相对封闭, 因此, 耕

收稿日期: 2021-10-17; 录用日期: 2021-11-28

作者简介: 范燕敏 (1975-), 副教授, 博士。研究方向为土壤质量监测与评价。E-mail: ymfantt@126.com。

通讯作者: 武红旗, E-mail: hqw7475@126.com。

地面源污染引起的湖泊生态环境问题慢慢凸显^[10]。关于焉耆盆地农田土壤的研究多集中在土壤重金属污染风险评价^[11-12]、土壤盐渍化^[13-15]、土壤有机质变化^[16]等方面,对于过量施用肥料引起的农业面源污染的风险研究较少,因此,本研究通过对比1980~2020年焉耆盆地土壤有效磷的时空变化,分析有效磷的富集区域,计算土壤磷生态环境风险等级,为减磷增效和面源污染监测研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

焉耆盆地位于新疆塔里木盆地东北侧,是天山山脉中的一个山间盆地,面积约 $1.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,包含和静县、和硕县、焉耆回族自治县、博湖县4县。盆地由西北向东南倾斜,边缘海拔1200 m左右,最低处博斯腾湖湖面为1047 m。焉耆盆地冬季严寒,春季气温回升迅速,夏季气候温和,秋季气温下降快,是南北疆气候交错带,具有阳光充裕,热量较丰富、气温日较差大、降水量小、蒸发量大、空气干燥等典型干旱区绿洲气候特征。棕漠土、草甸土、沼泽土、灌耕土、潮土、盐土、风化土等为盆地主要土壤类型。焉耆盆地由于独特的自然条件,大宗作物以棉花、小麦为主,特色作物为加工番茄、辣椒。

1.2 数据来源及处理

本研究对比了焉耆盆地1980、2010、2020年3个时期的耕层土壤(0~30 cm)有效磷含量的变化。1980年土壤有效磷数据来源于1980年巴音郭楞蒙古自治州土壤调查报告与博湖县、焉耆回族自治县、和静县、和硕县土壤调查报告中的相关数据,通过整理结合1979年土地利用情况、新疆土壤图、剖面描述及行政区划图,最终确定耕层有效磷样点109个;2010年数据来自测土配方施肥项目新疆骨干样点,通过分析确定耕层有效磷样点244个;2020年数据来自博湖县、和硕县、和静县、焉耆回族自治县年度土壤调查点,耕层有效磷样点195个。具体信息如表1。

表1 3个时期研究区样点数量及分布

年份	博湖县	焉耆 回族自治县	和静县	和硕县	总计
1980	25	27	39	18	109
2010	42	84	66	52	244
2020	29	55	64	47	195

基于1977~1980年的Landsat 2 MSS影像监督分类并目视解译得到1980年焉耆盆地耕地面积为1663.21 km²,数据与相关研究一致^[17]。使用GlobeLand30监督分类结合目视解译得到2010、2020年耕地面积数据,分别为2598.24、2815.64 km²。

1.3 数据分析

1.3.1 土壤有效磷分级标准

根据全国第二次土壤普查养分分级标准,对耕地有效磷含量进行划分(表2)。

表2 全国第二次土壤普查土壤有效磷分级

等级	极丰富	丰富	较丰富	中等	缺乏	极缺乏
	1级	2级	3级	4级	5级	6级
有效磷 (mg/kg)	≥40	20~40	10~20	5~10	3~5	<3

1.3.2 焉耆盆地耕地土壤磷生态风险系数计算

本研究利用环境敏感临界值来界定生态风险阈值。土壤磷环境敏感临界值是指当土壤磷素达到一定水平时,再进一步增加土壤磷将对环境有很大的影响。土壤环境敏感临界值是土壤是否大量流失磷时的土壤有效磷含量,大于该值,会有较大磷流失,小于该值,流失量较小。采用相对风险系数来表示耕地土壤磷富集造成的生态风险程度的高低^[18]。

相对风险系数=(有效磷测定值-有效磷生态风险临界值)/有效磷生态风险临界值

Zhou等^[19]基于中国472个大田试验观测的Olsen-P含量和磷损失率估算的国家级磷环境阈值为(30.1±4.0) mg/kg,在新疆进行磷环境阈值研究较少,因此采用Zhou等^[19]的研究结果,将30.1 mg/kg作为参考生态风险临界值。

2 结果与分析

2.1 焉耆盆地3个时期耕层有效磷含量统计特征

对3个时期焉耆盆地耕层土壤有效磷含量进行统计分析,由表3可知,1980年焉耆盆地耕层土壤有效磷含量在1.0~49.3 mg/kg之间,平均含量为9.3 mg/kg,处于4级水平,含量为中等。2010年焉耆盆地耕层有效磷含量在6.0~39.3 mg/kg之间,平均含量15.9 mg/kg,处于3级,含量较丰富,相对于1980年,有效磷含量提高了6.6 mg/kg。2020年焉耆盆地耕层土壤有效磷含量在6.4~

表 3 焉耆盆地耕层土壤有效磷含量统计 (mg/kg)

区域	年份	平均值	最大值	最小值	标准差
焉耆盆地	1980	9.3	49.3	1.0	7.9
	2010	15.9	39.0	6.0	9.1
	2020	34.0	87.7	6.4	19.1
博湖县	1980	9.5	49.3	1.7	10.4
	2010	15.8	35.6	6.0	9.5
	2020	48.0	87.7	12.6	21.8
和静县	1980	9.1	31.2	1.0	8.2
	2010	13.1	29.9	6.1	6.3
	2020	33.3	84.5	8.0	19.8
和硕县	1980	8.4	32.0	2.5	6.7
	2010	27.7	39.0	14.0	7.6
	2020	25.8	68.4	6.4	15.5
焉耆回族自治县	1980	9.7	21.5	1.0	5.4
	2010	10.8	22.0	6.0	3.3
	2020	34.6	70.7	13.2	15.5

87.7 mg/kg 之间, 平均含量 34.0 mg/kg, 处于 2 级, 含量丰富, 较 1980 年提高了 2.66 倍, 耕地有效磷含量得到极大提升。焉耆盆地各县的耕层有效磷含量均在升高, 最小值由 6 级升高到 3、4 级, 最大值由 2、3 级升高到 1 级, 有了很大程度的提高。

经 40 年的施肥, 焉耆盆地耕层土壤有效磷含量增加了 24.7 mg/kg, 年均增加 0.62 mg/kg, 各县有效磷年均增加量排序为: 博湖县 (0.96 mg/kg) > 焉耆回族自治县 (0.62 mg/kg) > 和静县 (0.61 mg/kg) > 和硕县 (0.44 mg/kg), 表现出明显的富集趋势。由各县土壤有效磷的标准差来看, 随着土地开垦与培肥, 土壤有效磷含量空间异质性加大。

通常认为, 土壤有效磷高于 15 mg/kg, 作物对施磷肥不敏感; 高于 20 mg/kg, 作物生长中均不缺磷^[20], 土壤磷有盈余。1980 年土壤有效磷高于 15 mg/kg 的样本仅占总样本的 3.7%, 高于 20 mg/kg 的样本占总样本的 10.1%; 2010 年分别为 9.4% 和 30.3%; 2020 年则分别为 13.3% 和 73.3%, 说明土壤有效磷含量一直在升高, 处于相对盈余的状态。

2.2 焉耆盆地 3 个时期耕层有效磷空间分布特征

在 ArcGIS 中对有效磷含量进行转换, 使 3 个时期耕层土壤有效磷含量服从正态分布, 确定 1980 年使用指数模型, 2010 年使用高斯模型, 2020 年使用指数模型。依据最优模型进行普通克里金插值, 获得 3 个时期焉耆盆地耕层土壤有效磷空间分布 (图 1)。

焉耆盆地 3 个时期耕层土壤有效磷含量由 4 级向 2、3 级转化。结合图 1 与表 4 可知, 1980 年焉

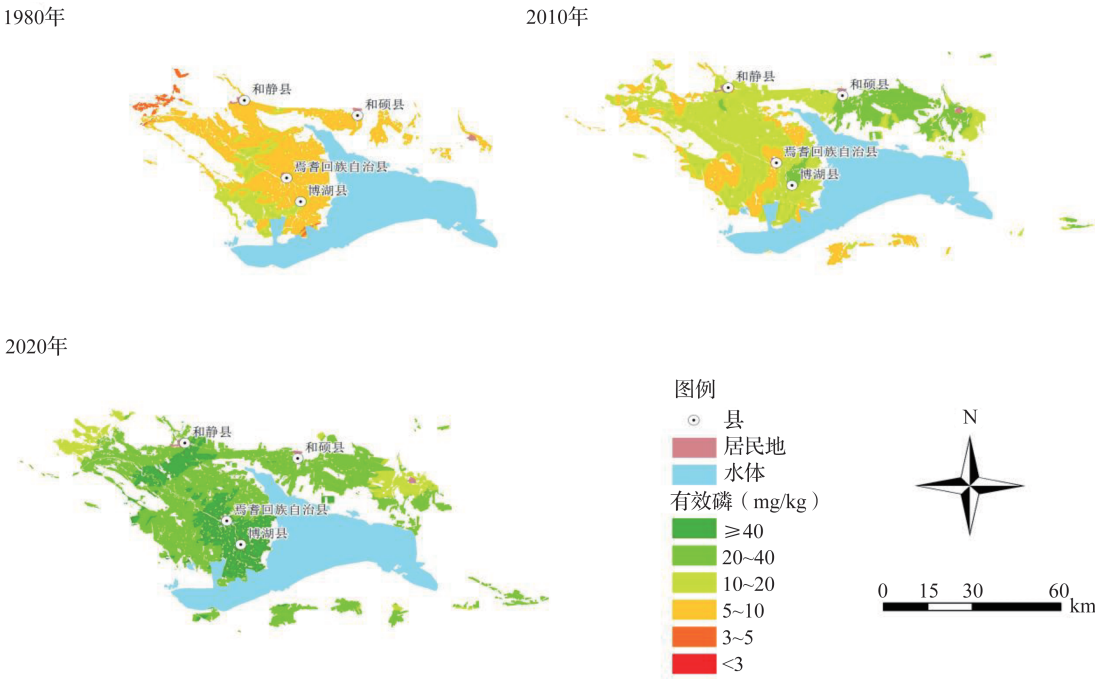


图 1 焉耆盆地耕地土壤有效磷分布

耆盆地耕地土壤有效磷主要为4级，无1、2级；1980 ~ 2010年，盆地内土壤有效磷含量均呈现明显增加的趋势，主要表现为4级向3级转化，2级也占有一定比例，无1、5、6级；2010 ~ 2020年，耕层土壤有效磷含量等级主要由3级向2级转化，1级占23.58%，无4、5、6级，有效磷含量增加的区域集中在焉耆回族自治县周围、和硕县东部、和静县周围和博湖县大部分耕地。由图1分析可知，新垦耕地主要分布在和硕县的东部和和静县的西部，土壤有效磷含量为3级，较丰富。

表4 焉耆盆地耕层土壤有效磷等级变化

年份	项目	1级 (≥ 40 mg/kg)	2级 (20 ~ 40 mg/kg)	3级 (10 ~ 20 mg/kg)	4级 (5 ~ 10 mg/kg)	5级 (3 ~ 5 mg/kg)	6级 (<3 mg/kg)	总计
1980	面积 (km ²)	0	0	305.35	1308.64	49.22	0	1663.21
	占比 (%)	0	0	18.36	78.68	2.96	0	100.00
2010	面积 (km ²)	0.09	488.69	1578.23	531.23	0	0	2598.24
	占比 (%)	0	18.81	60.74	20.45	0	0	100.00
2020	面积 (km ²)	663.93	1888.80	262.91	0	0	0	2815.64
	占比 (%)	23.58	67.08	9.34	0	0	0	100.00

2.3 焉耆盆地土壤有效磷生态风险现状评价

2020年焉耆盆地有效磷相对风险系数在-0.787 ~ 1.914之间，利用聚类分析划分生态风险临界点：<0为无风险，0 ~ 0.380为低风险，0.380 ~ 1.238为中风险，≥ 1.238为高风险，由此得到无风险样点占总样点的54.4%，低风险样点占总样点的14.4%，

中风险样点占总样点的25.0%，高风险样点占总样点的6.2%。

根据耕层土壤有效磷相对生态风险系数，借助ArcGIS软件空间插值分析，对研究区耕地土壤有效磷生态风险进行分区，结果如表5所示。

表5 焉耆盆地耕层有效磷生态风险等级

	无风险 (<0)	低风险 (0 ~ 0.380)	中风险 (0.380 ~ 1.238)	高风险 (≥ 1.238)	总计
总面积 (km ²)	1004.19	1063.27	747.99	0.18	2815.64
占比 (%)	35.66	37.76	26.57	0.01	100.00
博湖县 (km ²)	17.98	63.35	351.07	0.18	432.59
占比 (%)	0.64	2.25	12.47	0.01	15.36
和静县 (km ²)	220.80	393.70	298.26	0	912.76
占比 (%)	7.84	13.98	10.59	0	32.42
和硕县 (km ²)	593.79	22.17	0	0	815.96
占比 (%)	21.09	7.89	0	0	28.98
焉耆回族自治县 (km ²)	171.62	384.05	98.66	0	654.33
占比 (%)	6.10	13.64	3.50	0	23.24

由表5可知，焉耆盆地35.66%的耕地有效磷无生态风险，64.33%的耕地存在中低风险，高生态风险的耕地较少，仅在博湖县，且占比很低。博湖县的耕地面积最小，以中等风险为主，占该县耕地面积的81.65%；和静县无高生态风险耕地，以低风险为主，占该县耕地的43.13%，其次是中

等风险，占该县耕地的32.68%；和硕县耕地土壤有效磷大多为无生态风险，占该县耕地面积的72.77%，无中、高生态风险的耕地；焉耆回族自治县耕地以低生态风险为主，占该县耕地的58.69%，其次是无风险耕地，占该县耕地的26.23%。焉耆盆地耕地有效磷存在潜在生态风险的面积为

1811.45 km², 各县耕地有效磷存在潜在风险的面积由大到小为: 和静县 (691.96 km²) > 焉耆回族自治县 (482.71 km²) > 博湖县 (414.61 km²) > 和硕县 (222.17 km²)。土壤有效磷生态中风险区主要分布在和静县和博湖县, 尤其是博湖县大部分耕地为中风险, 对附近的博湖生态环境有潜在的威胁。

3 讨论

焉耆盆地隶属于巴州, 据测算巴州 2009 ~ 2015 年施用氮、磷、钾肥分别为: 290.55 kg/hm²、156.45 kg/hm²、27.75 kg/hm², N : P₂O₅ : K₂O = 1 : 0.54 : 0.1, 而我国肥料的消费比例 (N : P₂O₅ : K₂O) 为 1 : 0.49 : 0.24, 磷肥施用量高于全国平均水平^[9]。本研究表明, 经过 40 年的传统种植及产业结构调整, 焉耆盆地土壤有效磷得到了很大提高, 由中低水平达到了丰富水平, 有些耕地甚至超过了 40 mg/kg, 存在农业面源污染风险。因此, 焉耆盆地应该根据土壤有效磷水平的等级以及环境生态风险制定相应的施肥措施, 如对高磷肥力土壤, 根据磷素带走量, 在保证作物产量的前提下, 以环境风险为依据, 控制磷肥用量, 避免超过环境风险阈值^[21]。加拿大长期定位试验研究显示, 在典型褐灰钙土停止施磷肥 15 年 (1995 ~ 2010 年), 表层土壤 (0 ~ 7.5 cm) 有效磷 (Olsen-P) 从 26.5 mg/kg 显著下降到 10.9 mg/kg, 但小麦产量、秸秆产量、籽粒和秸秆中全磷的浓度及其他生长指标均无显著差异, 说明前期施肥 28 年 (1967 ~ 1995 年) 累积的土壤磷仍可以被作物有效利用^[22], 但是郭斗斗等^[23]对小麦-玉米轮作体系研究表明, 停止施磷肥后, 潮土的有效磷水平从初始的 72 mg/kg 下降至小麦磷农学阈值 (15 mg/kg) 仅需约 9.1 季, 并且停施磷肥后, 土壤的供磷能力下降很快, 小麦产量在第二年 (第三季) 即显著降低。因此, 不同地区应根据基础地力、土壤类型和作物类型等, 选择合理的磷肥施用量, 合理利用土壤积累态磷, 提高磷肥利用率。

根据作物产量与土壤有效磷的相应关系, 当土壤有效磷含量低于某一临界值, 产量随有效磷水平的增加而显著增加, 当有效磷含量高于临界值时, 产量无明显增加, 还会产生环境风险, 这一临界值即为作物高产的有效磷农学阈值^[24]。研究发现, 土壤 Olsen-P 的环境阈值大概是作物农学阈值的 2 ~ 10 倍^[25], Zhou 等^[19]分析表明, 我国耕

地有效磷的农学阈值为 (16.0 ± 6.4) mg/kg, 环境阈值为 (30.1 ± 4.0) mg/kg; 黄淮海半湿润平原区小麦玉米轮作下, 土壤 Olsen-P 的农学阈值为 15 mg/kg, 环境阈值为 30 mg/kg^[26]; 对于我国分布面积较广的 18 种土壤, 其中潮土、灰漠土、灌淤土等碱性土壤, 有效磷的农学阈值与环境阈值范围为 12 ~ 20 mg/kg; 红壤等酸性土壤, 有效磷的农学阈值与环境阈值范围为 20 ~ 40 mg/kg; 对于瘠土等石灰性土壤, 有效磷的农学阈值与环境阈值范围为 20 ~ 40 mg/kg^[27]; 可见, 部分土壤的有效磷环境阈值是农学阈值的 2 倍左右。张世民等^[28]在新疆阿克苏地区的春玉米试验表明, 土壤有效磷的农学阈值为 14.4 mg/kg, 据此推算, 其环境阈值在 28.8 mg/kg 左右。钟晓英等^[29]分析了我国 23 种耕地土壤, 认为不同土壤其临界值差异很大, Olsen-P 在 29.96 ~ 156.78 mg/kg 之间, 因此, 本研究参考的环境阈值 30.1 mg/kg 比较合理。鲁如坤^[30]认为土壤有效磷 50 ~ 70 mg/kg 可能是污染水源的临界指标, 北京市 2011 年公布的地方标准《农田氮磷环境风险评价》(DB11/T 749—2010) 中蔬菜地 Olsen-P 含量 50 mg/kg 为环境风险临界值^[31], 2020 年焉耆盆地大于该值的有 41 个点, 占到总样点的 21%, 也可以说明焉耆盆地的磷存在环境污染风险, 但是焉耆盆地加工番茄和辣椒用地与其他农作物用地实行轮作, 因此不能完全采用蔬菜用地的标准。另外, 土壤颗粒组成^[32]、有机质^[33]、pH 值、农业管理措施和土地利用方式对土壤磷素含量都有一定影响^[34], 因此各地、各研究得出的生态环境风险阈值会有差异, 新疆气候干旱, 土壤偏碱性, 磷固定量大, 土壤磷环境风险阈值更值得研究。

4 结论

1980 ~ 2020 年间, 焉耆盆地土壤有效磷含量由中等水平提高到丰富水平, 年均增加 0.62 mg/kg。1980 年焉耆盆地耕层土壤有效磷平均含量 9.3 mg/kg, 2020 年较 1980 年提高了 2.66 倍。焉耆盆地各县的耕层有效磷含量均在升高, 年均增加量排序为: 博湖县 > 焉耆回族自治县 > 和静县 > 和硕县, 表现出富集的趋势。

土壤有效磷含量空间异质性加大。1980 年焉耆盆地耕层土壤有效磷含量以中等为主, 2010 年耕层土壤有效磷以较丰富为主, 2020 年耕层土壤

有效磷含量以丰富为主,尤其是博湖县、和静县、焉耆回族自治县耕地土壤有效磷呈现富集。

2020年焉耆盆地部分耕地土壤有效磷有潜在的生态风险,占研究区耕地面积的64.34%,并且以中、低生态风险为主;高风险面积很小,仅占研究区耕地面积的0.01%。各县耕地有效磷存在潜在风险的面积由大到小为:和静县>焉耆回族自治县>博湖县>和硕县。

参考文献:

- [1] Sharpley A, Jarvie H P, Buda A, et al. Phosphorus legacy: Overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42 (5): 1308–1326.
- [2] 詹秋丽, 张黎明, 周碧青, 等. 福建耕地土壤磷素富集空间差异及其影响因素 [J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26 (2): 274–283.
- [3] 汪玉, 袁佳慧, 陈浩, 等. 太湖流域典型农田土壤磷库演变特征及环境风险预测 [J]. *土壤学报*, 2022, 59 (6): 1469–1478.
- [4] 周建斌, 翟丙年, 陈竹君, 等. 西安市郊区日光温室大棚番茄施肥现状及土壤养分累积特性 [J]. *土壤通报*, 2006, 37 (2): 287–291.
- [5] 李发林, 曾瑞琴, 危天进, 等. 福建省平和县琯溪蜜柚果园土壤磷环境风险评价研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23 (8): 1001–1009.
- [6] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33 (6): 214–221.
- [7] 田力文, 祁咏春, 戴路, 等. 新疆南疆耕地土壤养分含量及其分布特征评价—以阿克苏地区为例 [J]. *核农学报*, 2020, 34 (1): 214–223.
- [8] 陈家杰, 关钰, 王静, 等. 新疆农田施磷量、磷肥效率及磷肥品种长期演变 [J]. *新疆农业科学*, 2016, 53 (10): 1858–1866.
- [9] 吴默涵, 王爱春, 王金国, 等. 巴州农户施肥现状调查与评价研究 [J]. *新疆农业科技*, 2017 (3): 23–24.
- [10] 靳孟贵, 刘延锋, 董新光, 等. 节水灌溉与农业面源污染控制研究—以新疆焉耆盆地为例 [J]. *地质科技情报*, 2002, 21 (1): 51–54.
- [11] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆焉耆盆地辣椒地土壤重金属污染及生态风险预警 [J]. *生态学报*, 2018, 38 (3): 1075–1086.
- [12] 王维维, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 艾提业古丽·热西提, 等. 焉耆盆地不同耕地土壤中微量元素污染风险对比研究 [J]. *地球与环境*, 2018, 46 (6): 62–71.
- [13] 孔德庸, 盛建东, 武红旗, 等. 新疆焉耆盆地土壤盐分空间变异特征分析研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28 (2): 126–128.
- [14] 王维维, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 艾提业古丽·热西提, 等. 焉耆盆地农田耕层土壤盐分的空间变异及分布格局 [J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37 (2): 195–201.
- [15] 杨强军, 范燕敏, 耿庆龙, 等. 焉耆盆地耕地土壤盐分时空变化特征研究 [J]. *新疆农业大学学报*, 2020, 43 (5): 385–390.
- [16] 贾海霞, 汪霞, 李佳, 等. 新疆焉耆盆地绿洲区农田土壤有机碳储量动态模拟 [J]. *生态学报*, 2019, 39 (14): 5106–5116.
- [17] 张俊, 周成虎, 李建新. 新疆焉耆盆地近40年土地利用与土地覆被演化 [J]. *资源科学*, 2004, 26 (6): 30–37.
- [18] 巫顺金. 福建省耕地土壤磷素富集及其生态风险评价 [D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [19] Zhou J, Zhang Y F, WU K B, et al. National estimates of environmental thresholds for upland soil phosphorus in China based on a meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 780: 146677.
- [20] 鲁如坤. 土壤—植物营养学原理和施肥 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [21] 文方芳, 张梦佳, 张卫东, 等. 北运河上游昌平区化肥面源污染年际间差异分析 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41 (1): 15–20.
- [22] Liu J, Hu Y F, Yang J J, et al. Investigation of soil legacy phosphorus transformation in long-term agricultural fields using sequential fractionation, P K-edge XANES and solution P NMR spectroscopy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49 (1): 168–176.
- [23] 郭斗斗, 张珂珂, 王柏寒, 等. 潮土累积磷的供磷能力及其有效磷消耗特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27 (6): 949–956.
- [24] 刘建玲, 廖文华, 王新军. 大量施用磷肥和有机肥对白菜产量和土壤磷积累的影响 [J]. *中国农业科学*, 2006, 39 (10): 2147–2153.
- [25] Colomb B, Debaeke P, Jouany C, et al. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France [J]. *Europ. J. Agronomy*, 2007, 26: 154–165.
- [26] 习斌. 典型农田土壤磷素环境阈值研究—以南方水旱轮作和北方小麦玉米轮作为例 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [27] 席雪琴. 土壤磷素环境阈值与农学阈值研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [28] 张世民, 热汗古丽·阿不拉, 朱友娟, 等. 阿克苏地区春玉米磷阈值研究 [J]. *新疆农业科学*, 2016, 53 (3): 455–460.
- [29] 钟晓英, 赵小蓉, 鲍华军, 等. 我国23个土壤磷素淋失风险评估 I. 淋失临界值 [J]. *生态学报*, 2004, 24 (10): 2275–2280.
- [30] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护 [J]. *磷肥与复肥*, 2003, 18 (1): 4–8.
- [31] DB11/T 749–2010, 农田氮磷环境风险评价 [S].
- [32] Cox F R, Hendricks S E. Soil test phosphorus and clay content

- effects on runoff water quality [J]. Journal of Environment Quality, 2000, 29 (5): 1582–1586.
- [33] Blake L, Hesketh N, Fortune S, et al. Assessing phosphorus ‘Change-Points’ and leaching potential by isotopic exchange and sequential fraction [J]. Soil Use Management, 2002, 18: 199–207.
- [34] 肖鹏飞. 基于 GIS 的成都平原土壤磷素变化特征研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2005.

Temporal and spatial change characteristics of available phosphorus in cultivated soil in Yanqi basin and ecological risk analysis

FAN Yan-min, YANG Qiang-jun, WU Hong-qi*, DONG Tong (College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang 830052)

Abstract: Due to the excessive application of phosphate fertilizer, phosphorus is accumulated in the soil, and there is a potential risk of the environmental pollution. In this study, by comparing the changes of available phosphorus content in the cultivated layer of Yanqi basin in 1980, 2010 and 2020, the spatial and temporal enrichment characteristics of soil available phosphorus were analyzed, and the environmental risk was analyzed by using the relative ecological risk coefficient. The results showed that from 1980 to 2020, the available phosphorus in Yanqi basin increased from low to abundant level, and available phosphorus increased 2.66 times with an annual increase of 0.62 mg/kg. Bohu county had the highest annual increase of 0.96 mg/kg. Through the spatial interpolation analysis, the available phosphorus content of the cultivated soil in Yanqi basin was mainly moderate in 1980, it was relatively rich in 2010, and it was abundant in 2020, and the available phosphorus content of newly reclaimed land was also rich. The available phosphorus content in Bohu county, Hejing county, and Yanqi Hui autonomous county was enriched. According to the relative ecological risk coefficient of phosphorus in 2020, the environmental ecological risk area of available phosphorus was obtained by spatial interpolation analysis of Arc GIS. The part of the cultivated land in Yanqi basin had potential ecological risk, and its area was 1811.45 km², accounting for 64.34% of the cultivated land. The main risk types were medium and low ecological risks, and the area of high risk was small, accounting for only 0.01% of the study area. The area with potential risk of available phosphorus was as follows: Hejing county> Yanqi Hui autonomous county> Bohu county> Heshuo county. Therefore, according to the characteristics of available phosphorus enrichment of Yanqi basin, the regional nutrient management strategy should be adopted to reduce the risk of non-point source pollution, so as to reduce phosphorus and increase efficiency to promote environmental protection.

Key words: Yanqi basin; cultivated soil; available phosphorus; temporal and spatial change; ecological risk