

长期污水灌溉后林地土壤中磷的含量与移动

胡慧蓉^{1,2}, 王海龙², Mark Kimberley²

(1. 西南林学院环境科学与工程系, 昆明 650224; 2. Ensis, Private Bag 3020, Rotorua, New Zealand)

摘要:为尽可能地削减污水携带的N、P进入湖泊,处理后的城市生活污水被直接喷灌到新西兰罗托鲁阿市的Whakarewarewa森林,并建立了污水灌溉林地处理系统的长期定位试验地以评价生态系统对污水携带营养物质的同化能力.为查清长期污水灌溉土壤中P的数量、迁移淋失及其环境危机,对11a污水灌溉后火山灰土壤中磷的积累、再分布进行剖面分层采样测定.结果表明,土壤pH、TP、Olsen P、M3P、M3Ca和M3Mg在所有灌溉处理区的表层土壤(0~10 cm)均有显著($p < 0.05$)增加,部分增加的显著性达到20~40 cm土层或更深层次土壤.大多数随灌溉而进入土壤的P被保存在上层土壤(0~40 cm)中.土壤Olsen P和M3P的浓度在中、高水平处理区的20 cm以上土层中超过了环境临界值(Olsen P为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; M3P为 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),磷饱和度(M3PSR)数值同时显示表层土壤对P的吸持已近饱和,预示土壤磷素有随下渗水向下移动的潜在可能.常规土壤采样以 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Olsen P测定值为环境临界值,可解决土壤剖面中磷的下移监测难题.以M3P与M3Al、M3Fe的摩尔比计算的磷饱和度(M3PSR)作为长期污水灌溉林地处理系统中土壤磷向下移动的环境危机临界值参数指标已不是很理想,对新的磷饱和参数的研究是今后的主要工作之一.

关键词:污水灌溉; 林地; 磷的移动; 磷饱和度; 环境临界值

中图分类号:X131.3 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)08-1951-08

Contents and Movement of Phosphorus in Soil of Long Term Effluent Irrigated Land Forest

HU Hui-rong^{1,2}, WANG Hai-long², Mark Kimberley²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry College, Kunming 650224, China; 2. Ensis, Private Bag 3020, Rotorua, New Zealand)

Abstract: Treated sewage effluent from Rotorua City, New Zealand, has been spray-irrigated into Whakarewarewa Forest to minimize effluent-derived nitrogen (N) and phosphorus (P) entering Lake Rotorua. To assess the capacity of the ecosystem to assimilate the effluent derived nutrients, a long term field trial was established within the Rotorua land treatment system. The objective of this study was to determine the accumulation, redistribution and movement of P in the volcanic soil after 11 year effluent irrigation. The soil samples were analyzed. Soil pH, total phosphorus (TP), Olsen P, Mehlich-3 P (M3P), M3Ca and M3Mg had increased significantly ($p < 0.05$) in the top soil (0-10 cm) in all effluent treated plots compared with the control plots. Some significant increase had extended deeper soil layer (20-40 cm) or much deeper soil layer. Most effluent-derived P had accumulated in top 40 cm. Concentrations of soil Olsen P and M3P in the medium and high effluent treatments were over environmental threshold levels (Olsen P, $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; M3P, $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in the top 20 cm. The values of soil saturation ratio (M3PSR) show that it was nearly saturated of soil P sorption in top soil. It was suggested that there was a potential environment crisis for soil P to move downward with drainage water. Regular soil sampling and Olsen P measurement using $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ as an environment threshold could provide a solution for monitoring the movement of P down the soil profile. Phosphorus saturation ratio index (M3PSR) calculated as the molar ratio of M3P to (M3Al + M3Fe) appeared to be inadequate as an indicator for downward movement of soil P in such land treatment system. A new Phosphorus saturation ratio index for this system will be one of future study work.

Key words: effluent irrigation; land forest; phosphorus movement; phosphorus saturation ratio (PSR); environment threshold level

近年来,为缓解水资源紧缺并实现城市生活污水及其中所含养分的再生利用,同时简化污水的进一步处理,许多国家和地区都尝试将经初步处理的城市生活污水进行土地灌溉.由于污水中含有大量植物生长所需营养成分,长期的污水灌溉,势必增加灌溉区内土壤的养分含量.通常,在确定土地灌溉系统的灌溉定额时,人们往往以土壤渗透性为基础,或以植物对氮(N)的需求为计算依据.若以植物对N

的需求制定灌溉定额,可能导致污水中含量较高的其它营养元素的过量供应与土壤积累,尤其是使水体富营养化的主要成分磷(P)^[1].然而,土壤对P的

收稿日期:2009-11-06;修订日期:2010-03-16

基金项目:云南省教育厅基金项目(07Z10720);国家留学基金西部地区人才培养项目(500003);西南林学院水土保持与荒漠化防治重点学科项目

作者简介:胡慧蓉(1964~),女,博士研究生,副教授,主要研究方向为土壤与恢复生态,E-mail:hhr@swfc.edu.cn,hhrxl@163.com

吸持能力有限,并因土壤特性而不同.当 P 大量进入土壤而使土壤对 P 的吸持力达到饱和,过量的 P 将被土壤释放并淋失^[1,2].因此,以土壤渗透性能或植物对 N 的需求为基础确定灌溉定额时,污水携带的 P 在土壤中的积累很可能成为污水灌溉土地处理系统良好运行的一个限定因子^[3].为监测因灌溉而进入土壤中的 P 的动态,预测因土壤中的 P 进入地表/地下水引起水体富营养化的潜在风险,土壤 P 的研究方法和评价参数被不断深化,如:P 吸附参数 (P sorption index, PSI)、P 饱和度 (degree of phosphorus saturation, DPS)、P 临界水平 (threshold P level)、Mehlich-3 (M3) P 饱和率 (Mehlich-3 P saturation ratio, M3PSR)、P 的系列分级 (sequential fractionation of phosphorus) 等^[4-12].这些研究结果为更好地理解土壤 P 的吸持能力、饱和情况与土壤中 P 的潜在淋失风险关系奠定了基础.

新西兰罗托鲁阿 (Rotorua) 市,由于长期将经二次处理后的城市生活污水直接排放进入罗托鲁阿湖,导致湖水有富营养化和蓝藻繁殖趋势.为缓解环境压力,同时对城市生活污水进行资源再利用,1991 年在 Whakarewarewa 林区布设了一个土壤-水-植物土地处理系统林地喷灌长期定位试验.通过污水灌溉补充林地土壤养分的同时,进一步实现去除污水中营养物质,净化水质的目的,并对系统中林木、土壤、下渗水等因子作同步监测.试验初期的结果表明,流经土地处理系统进入罗托鲁阿湖的溪流中净 N、P 量与污水直接排放相比明显减少^[13],但溪水中的 N 含量有逐年增加的趋势,P 含量变化不大^[14].研究同时认为,虽然灌溉用污水携带了大量 P 进入土地处理系统的土壤中,但人们对 P 在土壤中的转化、运移状况几乎不了解,因此很难判断灌溉究竟是

否会对罗托鲁阿湖水体构成威胁.为明确灌溉对系统土壤中 P 的积累、移动及淋失的影响,借助国际上用以监测 P 环境危机的最新研究方法 with 参数,本研究对罗托鲁阿土地处理系统 11a 污水灌溉后土壤中的 P 进行分析测试,对土壤剖面中 P 的淋失可能性作出分析,以期城市生活污水的林地长期灌溉利用是否会引发环境问题的进一步研究提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于新西兰北岛中部罗托鲁阿市 Waipa 流域的 Whakarewarewa 林区商用辐射松林地.土壤为火山灰土,质地砂壤,多大孔隙、渗透性好 (饱和导水率 $>45 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$),几乎无径流^[13].罗托鲁阿平均降水量 $1491 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,平均蒸发量 $1186 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$.

试验以长期田间喷灌定位观测的形式于 1991 年 10 月开始实施.试验区内设 4 个污水灌溉率处理:0 (对照)、37 (低)、71 (标准)、112 (高) $\text{mm} \cdot \text{周}^{-1}$.每个灌溉处理设 3 个重复小区,每小区均由外部区域 $60 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ (灌溉)和内部区域 $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ (采样与观测)~.

1991 年 10 月~1995 年 12 月的 50 个月污水处理厂输出端检测数据显示 (表 1),灌溉污水中总 P (total P, TP) 浓度平均为 3.10 mg/L ,变化范围 $0.4 \sim 9.0 \text{ mg/L}$ ^[15].以此数据为基础进行计算,到截止采样的 2002 年 6 月 (灌溉累计 128 个月)随污水灌溉进入土壤的 P 累计总量约为:对照区 0、低处理区 $605 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以中等灌溉率的 0.52 倍计算)、中处理区 $1163 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、高处理区 $1837 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以中等灌溉率的 1.58 倍计算).

表 1 1991 年 10 月~1995 年 12 月试验期间灌溉污水中的营养成分¹⁾

Table 1 Nutrients in effluent applied in the trail during Oct. 1991 to Dec. 1995

参数	N	P	Ca	Mg	K	Na
浓度 (范围)/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	11.2 (6.6 ~ 17.0)	3.1 (0.4 ~ 9.0)	8.5 (4.3 ~ 23.7)	1.0 (0.3 ~ 1.9)	11.9 (8.6 ~ 14.1)	50.1 (32.6 ~ 63.8)
年均用量/ $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	399	109	282	36	439	1999

1) 年均用量指中等灌溉率 $71 \text{ mm} \cdot \text{周}^{-1}$ 下每年携带进入试验区土壤中的养分量,高灌溉率区用量是中等灌溉率区的 1.58 倍,低灌溉率区用量为中等灌溉率区的 0.52 倍

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集

2002 年 6 月进行土壤分析样品采集.采样深度分别为 $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60$ 和 $60 \sim 100 \text{ cm}$,用 30 mm 内径土钻,在各小区内多点采样并充

分混匀.样品经风干、磨细过 2 mm 筛,保存于玻璃瓶中备用.

1.2.2 样品分析

样品分析工作于 2006 年 6 月~2007 年 2 月在新西兰 Ensis (皇家林业研究所) Veritec 实验室进行,采

用当前国际上最新的土壤 P 环境效应研究方法.

(1) 土壤常规测定 土壤水分在 105℃ 下烘干测定;土壤有机碳(C)、全氮(TN)以 Leco CNS-2000 干烧测定;土壤 pH 采用 1:2.5 的土水比在酸度计上测定.

(2) 土壤中常规磷的测定 采用抗坏血酸还原-钼蓝比色法^[16]测定土壤中各种形态 P 的含量.其中,样品全 P(TP)以半微量 K 氏法消解^[17,18]并测定;速效 P 采用 Olsen P 方法测定^[19].

(3) 有效磷、铁、铝、钙、镁的测定 以 Mehlich-3(M3)为浸提液,1:10 土液比浸提土壤,ICP-OES(Perkin Elmer Optima 3000DV)测定所得浸提液中的 P(M3P)、Al(M3Al)、Fe(M3Fe)、Ca(M3Ca)和 Mg(M3Mg).M3 浸提液为:0.2 mol/L CH₃COOH + 0.25 mol/L NH₄NO₃ + 0.015 mol/L NH₄F + 0.13 mol/L HNO₃ + 0.001 mol/L EDTA^[20].

(4) 土壤磷饱和度 M3PSR 的计算 M3PSR 以 Maguire 法计算 (mmol·kg⁻¹): M3PSR-I = M3P/(M3Al + M3Fe); M3PSR-II = M3P/M3Al^[9,11].

1.3 统计分析

以 SAS/STAT 版本^[9] GLM 程序的变异分析 (ANOVA) 和 Tukey 最小显著性差异分析法 (HSD),进行城市生活污水灌溉处理试验的显著性统计检测,SAS REG 程序进行回归分析.

2 结果与分析

2.1 灌溉对土壤部分化学特性的影响

土壤酸性是一个较为重要的化学性质,它与土壤中离子有效性有密切的关系.由于土壤的缓冲性,衡量土壤酸碱性的强度指标 pH 值相对稳定,一旦 pH 数值改变,则土壤化学性质也会相应变化.表 2 数据显示,11 a 污水灌溉使所有灌溉处理区的土壤全剖面(0~100 cm) pH 值与对照相比有显著增加($p < 0.05$).在对照中,土壤 pH 约 5.3~5.7,表现为变幅很小的弱酸性土壤.经污水灌溉处理后,各区土壤 pH 在 6.1~6.5 范围变动,比对照分别升高:低处理区 0.47~0.74,中处理区 0.66~0.96,高处理区 0.74~0.92 个单位,土壤已趋中性反应.土壤反应的变化,势必影响长期接受污水灌溉的林地土壤中一些离子的溶解有效性.

表 2 污水灌溉对土壤部分化学性质的影响¹⁾

Table 2 Selected chemical properties of soils at irrigation sites

处理	土层深度 /cm	pH	浓度/mg·kg ⁻¹				
			C	TN	C/N	TP	Olsen P
对照	0~10	5.32b	0.450a	0.024a	18.8a	292b	3.3b
低		6.06a	0.532a	0.029a	18.3a	862a	66.6a
中		6.28a	0.590a	0.032a	17.9a	1067a	92.7a
高		6.24a	0.553a	0.033a	17.3a	1106a	93.6a
对照	10~20	5.64b	0.280a	0.015a	18.7a	244b	2.2b
低		6.32a	0.303a	0.016a	18.9a	494ba	26.4a
中		6.46a	0.312a	0.016a	20.6a	830ba	60.3a
高		6.46a	0.329a	0.016a	19.5a	984a	72.2a
对照	20~40	5.66b	0.170a	0.009a	18.9a	182b	1.3b
低		6.35a	0.220a	0.012a	18.3a	248ba	2.7b
中		6.52a	0.228a	0.011a	20.7a	372ba	13.3ba
高		6.49a	0.233a	0.012a	19.4a	703a	38.7a
对照	40~60	5.70c	0.142a	0.008a	17.8a	162b	1.5b
低		6.22b	0.175a	0.010a	17.5a	213ba	1.3b
中		6.52ba	0.154a	0.008a	19.3a	223ba	1.9b
高		6.47a	0.188a	0.010a	18.8a	316a	7.1a
对照	60~100	5.71b	0.130a	0.007a	18.6a	165a	0.9a
低		6.18a	0.120a	0.006a	20.0a	184a	1.3a
中		6.37a	0.117a	0.005a	23.4a	177a	1.3a
高		6.45a	0.137a	0.007a	19.6a	258a	3.3a

1) 表列中同一深度数值后所带不同字母表示显著性差异在 $p < 0.05$, $n = 60$, 下同

长期污水灌溉后,林地土壤有机碳(C)变化轻微,仅0~60 cm土层有统计不显著($p < 0.05$)的微小增加(表2).土壤全氮(TN)量的轻微增加仅出现在0~10 cm表层土中,且变化没有达到统计显著.因此,土壤中C/N值的变化并不大.由于这一污水灌溉系统的灌溉标准,是以灌溉进入土壤中的N素营养可满足林木生长需求为计算依据制定的.因此,随着林木生长对养分的不断吸收利用,由灌溉进入土壤的N素被消耗,研究没有观测到土壤中N素水平的增加符合预先设定的试验要求.

与土壤有机C和TN不同,土壤中TP与Olsen P的数量有明显改变(表2).与对照相比,经污水灌溉处理的各试验区土壤中TP含量在0~40 cm土层中均明显增加,并在表层(0~10 cm)土壤达显著性水平($p < 0.05$),高处理区的TP显著性($p < 0.05$)增加已达深层(40~60 cm)土壤.伴随着TP的增加,Olsen P也表现出相似的变化趋势,各处理区Olsen P的显著性($p < 0.05$)增加达亚表层(10~20 cm)土壤,而这一显著性增加现象在高处理区深层(40~60 cm)土壤同样观测到.土壤剖面不同深度TP与Olsen P的数据变化说明,长期的污水灌溉已导致40 cm以上的土壤中全P与速效P明显增加,而表层土壤增加最为显著.

2.2 污水灌溉对土壤中有效P、Ca、Mg、Fe、Al和土壤P饱和度M3PSR的影响

2.2.1 灌溉对土壤中有效P、Ca、Mg、Fe、Al的影响

以M3浸提剂提取并测定的土壤有效阳离子数据显示(表3),污水灌溉处理区土壤M3P的变化趋势与TP、Olsen P的表现很相似.灌溉后各处理区土壤剖面中M3P浓度在表层(0~10 cm)显著增加($p < 0.05$),中、高水平处理区的显著性增加($p < 0.05$)达到亚表层(10~20 cm)土壤,高处理区20~40 cm土层中的M3P浓度也呈非显著性增加.结果表明,长期污水灌溉后,各灌溉处理区土壤活性P(M3P)在上层土壤中有积累明显.

土壤中磷的移动性与有效性很大程度上受游离Ca、Mg、Fe、Al等阳离子的影响^[21].与对照相比,土壤中M3Ca和M3Mg的浓度在所有灌溉处理区的0~40 cm土层中呈现显著性增加($p < 0.05$),高处理区的显著性增加($p < 0.05$)贯穿全土壤剖面(0~100 cm)(表3),表明灌溉污水所携带的大量Ca、Mg离子存留在了上层土壤中,并呈现随下渗水向下转移的趋势,且灌溉定额越高Ca、Mg离子的累积与转移量就越大.数据显示,各处理区土壤的M3Ca、M3Mg浓度在20~40 cm深土层差异较大,在此土层范围,高处理区土壤的M3Ca与M3Mg浓度分别

表3 以Mehlich-3提取的土壤中离子含量和P饱和度
Table 3 Contents of soil ions and P sorption rate by Mehlich-3 extracted

处理	土层深度 /cm	元素/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$					$\text{M3PSR}/10^{-2}$	
		M3P	M3Ca	M3Mg	M3Al	M3Fe	M3PSR-I	M3PSR-II
对照	0~10	12.0b	1 063b	158b	2 861b	164a	0.35c	0.36c
低		166.0a	2 470a	357a	2 283a	154a	6.09b	6.29b
中		289.0a	3 224a	376a	2 155a	143a	11.55ba	11.95ba
高		298.0a	3 843a	424a	2 041a	173a	12.32a	12.85a
对照	10~20	6.4b	405b	64b	2 921a	72a	0.19b	0.19b
低		46.0ba	1 027a	154a	2 615a	93a	1.53ba	1.56ba
中		160.0a	1 603a	169a	2 471a	88a	5.84a	5.96a
高		187.0a	2 170a	193a	2 585a	113a	6.14a	6.29a
对照	0~10	2.6a	132c	20b	2 890b	55a	0.08ba	0.08b
低		2.3a	390b	68a	2 565ba	50a	0.08b	0.08b
中		19.0a	626ba	101a	2 515a	52a	0.61ba	0.61ba
高		74.0a	1 121a	106a	2 497a	64a	2.56a	2.60a
对照	40~60	1.3a	83b	20b	2 774a	48a	0.04a	0.04a
低		0.9a	180ba	48ba	2 590a	44a	0.03a	0.03a
中		1.2a	208ba	50ba	2 447a	39a	0.04a	0.04a
高		6.7a	572a	67a	2 588a	50a	0.21a	0.22a
对照	60~100	0.6a	65b	21b	2 737a	48a	0.02a	0.02a
低		0.6a	99ba	31ba	2 608a	46a	0.02a	0.02a
中		0.3a	102ba	38ba	2 556a	41a	0.01a	0.01a
高		2.8a	284a	52a	2 609a	43a	0.10a	0.10a

比对照高出 8 倍和 5 倍,而低、中处理区土壤也分别比对照高出约 5 倍和 3 倍. 污水处理厂输出污水的成分分析(表 1)表明,其中含有较多的 Ca、Mg 离子,随污水的持续灌溉,土壤中游离 Ca、Mg 离子的浓度将持续提高.

灌溉导致土壤 M3Fe、M3Al 的变化与 M3Ca、M3Mg 有很大不同. 污水灌溉区土壤为火山灰土,其成分复杂,Fe、Al 含量一般较高(表 3). 经污水灌溉后,各处理区土壤(0 ~ 100 cm) M3Fe 浓度变化微弱,而 M3Al 浓度明显降低,并在各处理区土壤表层降低显著($p < 0.05$,见表 3).

2.2.2 灌溉对土壤 P 饱和度(PSR)的影响

土壤对 P 的吸持主要表现为形成难溶沉淀磷酸铁(Fe-P)、磷酸铝(Al-P)(酸性条件)或磷酸钙(Ca-P)、磷酸镁(Mg-P)(碱性条件). 因此,土壤的 P 吸持饱和程度取决于土壤中 P 的水平,以及交换性 Fe、Al(酸性)或 Ca、Mg 离子(碱性)含量的高低. 就某一成分、性质保持基本稳定的土壤而言,如含 P 过量而呈现吸持过饱和状态,过量的 P 就将因释放或解吸而产生移动、渗透与淋失. 为更好地描述酸性土壤中潜在的 P 吸附点(活性 Al、Fe)对 P(活性 P)的吸持饱和程度,以 M3P 与(M3Al + M3Fe)或 M3Al 的摩尔比计算得到的 M3PSR(M3PSR-I 或 M3PSR-II),目前已成为衡量土壤 P 吸附饱和程度的新参数^[9,23,24].

表 3 中 M3PSR-I、M3PSR-II 根据 Sims 和 Maguire 等^[9,11]报道的对弱酸性砂质壤土中 P 饱和率的计算方法得到. 结果显示,与对照相比,各处理区 40 cm 以上土层的 M3PSR 值明显升高,显著增加($p < 0.05$)分别出现在:低处理区表层(0 ~ 10 cm),中处理区达亚表层(10 ~ 20 cm),高处理区则达 20 ~ 40 cm 土层. 明显升高的 M3PSR 值预示着因灌溉而大量增加的 M3P 在表层土壤中已不能被 M3Al(或 M3Fe + M3Al)很好地吸附保存,过量的 M3P 开始向下移动^[24]. 这与 TP、Olsen P 的表现趋势是一致的.

3 讨论

3.1 灌溉与土壤中 P 的淋失

McLay 等^[15]研究报道,在本试验区污水灌溉 4 a 后,土壤 pH 升高约 0.5 个单位,土壤阳离子代换量(CEC)也有升高,变化在高处理区更明显. 同时认为,灌溉后随着土壤 pH 的升高,土壤交换性阳离子(如:Na、Ca、Mg 等)增加,随污水灌溉而进入土壤的

Na、Ca、Mg 停留于土体(更多为二价离子),并影响土壤阳离子代换能力. 另有研究报道,土壤中 Al 离子的有效性受土壤酸碱环境影响较大,有由酸到碱其有效性逐渐下降的趋势^[22,25]. 本研究中,长期灌溉处理后土壤 pH 值逐渐升高至近中性,可能是土壤剖面中 M3Al 浓度下降的主要原因之一. 而长期污水灌溉于具有良好导水性能的火山灰土上,引起上层土壤的较强淋溶,可能是污水灌溉处理区表层土壤 M3Al 浓度降低更为明显的另一原因. M3Al 的减少意味着土壤对 P 的吸持能力下降.

TP、Olsen P、M3P 浓度的显著($p < 0.05$)增加,是长期污水灌溉后土壤的一个明显变化. Heckrath 等^[5]对英国 Rothamsted 长期施用磷肥的不同质地土壤中 P 的浓度与渗透水中 P 的数量关系进行监测研究,认为 Olsen P 浓度 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 可作为环境临界值来预测土壤剖面中 P 的潜在淋失. 当土壤 Olsen P 高于临界值时,土壤吸持的 P 将被快速释放并随水下渗而影响地下与周边水体环境^[26,27]. 类似地,M3P 也被视为农业与环境土壤测定的环境参数临界指标,尤其对含有较多含水氧化 Fe、Al 的土壤^[9,28]. Sims 等^[9]认为:对弱酸砂质土壤,若 M3P 浓度高于 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有可能导致可溶性 P 从土壤中淋失进入地下水. 对照表 3 数据,所有灌溉区表土(0 ~ 10 cm),以及中、高处理区亚表层(10 ~ 20 cm)土中,Olsen P 与 M3P 的含量均高于上述对应的环境临界值. 若以 Olsen P 或 M3P 浓度为判断指标,均可得出随污水长期灌溉,上层土壤中活性 P 显著增加并呈现向下淋失趋势的相同结论.

目前,M3PSR 越来越多地被用做衡量土壤中 P 潜在环境危机的预测参数^[9,15,23,28]. Sims 等^[9]建议以 M3PSR-I 值 0.15 为弱酸性低有机质土壤 P 淋失的环境危机临界值(严重环境危机),将 M3PSR-I 值 0.11 作为环境危机响应值(中等环境危机). Kleinman 等^[23]报道,将 M3PSR-I 与 M3PSR-II ($R^2 = 0.99^*$, $M3PSR-II = 1.11M3PSR-I - 0.002$, $n = 60$, * 表示显著性水平 $p < 0.001$)作为环境标准运用于酸性土壤预测土壤中活性 P 的潜在淋失较为准确. 本研究中 M3PSR-I 与 M3PSR-II ($R^2 = 0.9999^*$, $n = 60$)几乎相等,因而可同时用于判断污水灌溉处理后土壤中 P 的潜在淋失风险. 所有灌溉处理区土壤全剖面(0 ~ 100 cm)中的 M3PSR 值并没有达到环境危机临界值 0.15,仅中、高处理区表层(0 ~ 10 cm)土壤 M3PSR 值高于环境危机响应值 0.11. 由此可知,虽土壤中活性 P 含量随污水灌溉而

明显增长并有淋失趋势,但由于土壤中交换性 Fe、Al 的吸持作用大大缓解了 P 的淋失过程,该土地处理系统对净化污水,改善环境确已发挥明显作用。

3.2 判断土壤中 P 淋失的指标

由于 P 在土壤中有移动较慢的特点,因此本污水灌溉土地处理系统在以污水含 N 量计算灌溉定额的同时,以土壤对 P 的吸持是否饱和为灌溉期望年限的确定依据,保证由灌溉携带进入土壤中的 P 不会导致环境水体的污染破坏。从表 2、3 中 TP、活性 P 浓度与 M3PSR 值的变化看出,土壤中 P 的向下移动可以在上层土壤对 P 的吸附达饱和前发生。

目前,Olsen P、M3P 和 M3PSR 是监测土壤剖面中活性 P 的向下移动和判断其潜在淋失危机的常用参数指标,但三者间存在一定差异。Olsen P、M3P 常用来预测 P 在土壤中向下移动的程度和潜在的淋失趋势。M3PSR 用以描述土壤对 P 吸持的饱和程度,其数值变化幅度小并较 Olsen P、M3P 滞后(表 2、3)。若 M3PSR 值达到环境危机临界值,则说明土壤对活性 P 的吸持作用已达饱和,解吸或未被吸持部分将快速移动至下层土壤;若下层土壤中 M3PSR 也达到环境危机临界值,就表明土壤已失去对活性 P 的吸持能力,P 将通过下渗水进入地下水造成环境影响。由于 3 个参数指标说明问题的角度不同,因此判断土壤中是否有 P 的潜在淋失与环境风险时,应同时考虑 3 个指标的综合反映。

本研究中,Olsen P 与 M3P 的浓度变化所反映的环境影响趋势相同。Olsen P 与 TP 间($R^2 = 0.89^*$, $n = 60$)、M3P 与 TP 间($R^2 = 0.80^*$, $n = 60$)和 Olsen P 与 M3P 间($R^2 = 0.84^*$, $n = 60$)均存在显著的线性关系,但 Olsen P 与 TP 间的相关性更好。虽近年来以 M3 浸提液提取测定土壤中各种交换性元素已越来越多见^[29,30],通过土壤中 P、Fe、Al、Ca、Mg 等相关离子的测定,可更好地理解 P 在土壤中的迁移转化过程,帮助判断土壤对 P 的吸持能力和确定污水灌溉土地处理系统的灌溉时限,但 Olsen P 的测定更具便捷广泛的特点。因此,有条件时,可将 Olsen P、M3P 和 M3PSR 3 个指标同时测定使用,无疑能很好地判断土壤中是否存在 P 的潜在淋失与环境危机;但在条件不适宜,无法获得 3 个测定指标时,以 Olsen P($60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)为参数,也可监控污水灌溉土地处理系统中土壤 P 的迁移与潜在环境危机,尤其在土壤发育程度较低,土层厚度较浅的地区。

3.3 关于土壤 P 淋失指标

本污水灌溉土地处理系统的试验设计,以该区火山灰土中三水铝石含量、土壤 P 吸附曲线,以及土壤对 P 的吸持饱和度为依据,确定系统将有 70 ~ 130a 的灌溉期限^[13]。Perrott 等^[31]通过对系统内灌溉后土壤剖面中 P 的移动和地下侧流对浅层土壤 P 吸持能力的影响研究,进一步推断该系统的灌溉时限可能为 50a。然而本研究结果显示,11 a 的污水灌溉已引起系统内土壤部分化学性质(如 pH、TP、交换性(M3)P、Fe、Al、Ca、Mg 等)的改变,这些改变不仅影响了土壤对 P 的吸持能力,已被土壤所吸持沉淀的 Fe-P、Al-P 也可能发生解吸重新进入土壤溶液产生新的淋失,从而使以 P 为限制因子制定的灌溉林地处理系统的预期时限估测复杂化。另一方面,系统内土壤反应渐趋中性,将导致土壤中活性 P 的进一步增加;M3Al 的不断降低,也使土壤对活性 P 的吸附能力逐渐减弱。相应地,显著增加的 M3Ca、M3Mg 可能成为土壤中吸附活性 P 的主要成分。

有研究指出^[32],约 30a 城市与工业废水灌溉后,土壤 0 ~ 15 cm 土层中的 pH 从约 5 ~ 6 升高为约 7.4 ~ 7.8,灌溉初期土壤中以 Al-P 为主,但灌溉 30a 后 Ca-P 占了优势。本研究的数据分析显示,M3P 和 M3Al($R^2 = -0.32$, $n = 60$, $p < 0.05$)间有显著的负相关关系。基于土壤中 M3Al(M3Al + M3Fe)浓度计算得到的 M3PSR 并没有考虑土壤中 M3Ca、M3Mg 对活性 P 的吸附影响,但系统内随灌溉显著增加的 M3Ca、M3Mg 在土壤 pH 升高后势必对活性 P 的吸附作用有越来越大的影响。因此,今后的研究应侧重于 M3Ca 和 M3Mg 与土壤中活性 P 的作用,发展以 M3P、M3Ca、M3Mg 的浓度为计算依据的新 M3PSR 参数[M3PSR-III = $M3P/M3Ca$,或 M3PSR-IV = $M3P/(M3Ca + M3Mg)$],与 M3PSR-I、M3PSR-II 共同作为长期污水灌溉土地处理系统中土壤 P 淋失环境危机临界值或环境危机响应值,更好地阐述系统中土壤 P 潜在的迁移与环境危机。

4 结论

(1) 各灌溉处理区 100 cm 深土壤剖面中 pH 显著增加,土壤有由弱酸性向中性过渡的趋势。土壤有机 C 和 TN 几乎没有变化,M3Ca 和 M3Mg 的浓度在各处理区土壤中呈增加趋势,而 M3Al 浓度逐渐减少。

(2) 土壤 TP、Olsen P、M3P 在所有处理区的上层土壤(0 ~ 10 cm)均显著增加,大多数随污水灌溉进入土壤的 P 被保存在上层土壤(0 ~ 40 cm)中。土

壤 Olsen P 和 M3P 浓度在中、高处理区的 20 cm 以上土层中超过了环境临界水平,土壤活性 P 有随下渗水下移的潜在可能。

(3) Olsen P 与 M3P 同是判断土壤中 P 淋失潜在危机的参数指标,Olsen P 比 M3P 测定更便捷。显示土壤 P 吸持饱和程度的 M3PSR 参数指标,数值变化比 Olsen P 与 M3P 有一定滞后性。三者结合使用能更好地说明污水灌溉后土壤中 P 的淋失趋势与环境危机。

(4) 针对试验区土壤中显著增加的 M3Ca 和 M3Mg,研究制定在 M3Ca、M3Mg 基础上的 M3PSR 指标 M3PSR-Ⅲ、M3PSR-Ⅳ,与 M3PSR-Ⅰ、M3PSR-Ⅱ共同作为污水灌溉土地处理系统中土壤 P 淋失的环境危机值参数指标,可更好地阐述系统中土壤 P 的迁移淋失与潜在环境危机。

致谢:感谢新西兰研究、科学与技术基金,Rotorua 区委会提供的污水携带物数据,Fletcher Challenge Forests 提供的研究场地,D. Gragam 的土壤样品采集,Veritec 实验室全体人员的技术支持。

参考文献:

- [1] Allen B L, Mallarino A P. Relationships between extractable soil phosphorus and phosphorus saturation after long-term fertilizer or manure application[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, **70**: 454-463.
- [2] Zvomuya F, Rosen C J, Gupta S C. Phosphorus sequestration by chemical amendments to reduce leaching from wastewater application[J]. *J Environ Qual*, 2006, **35**:207-215.
- [3] USEPA. Process design manual—Land treatment of municipal wastewater. EPA 625/-81-013 (COEEM 1110-1-501) [S]. Cincinnati, OH, USA: Center for Environmental Research Information, USEPA, 1981.
- [4] Hedley M J, Stewart J W B, Charhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions by cultivation practice and by laboratory incubations[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1982, **46**: 970-976.
- [5] Heckrath G, Brooks P C, Poulton P R, *et al.* Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the broadbalk experiment[J]. *J Environ Qual*, 1995, **24**: 904-910.
- [6] Sharpley A N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus[J]. *J Environ Qual*, 1995, **24**: 920-926.
- [7] Snyder C S, Bruulsema T W, Sharpley A N, *et al.* Site specific management guidelines: Site-specific use of the environmental Phosphorus-Index concept [S]. Norcross, GA: Site Specific Management Guidelines SSMG-I. Potash and Phosphate Institute, 1999.
- [8] Chang A C, Page A L, Sutherland F H, *et al.* Fractionation of phosphorus in sludge-affected soils[J]. *J Environ Qual*, 1983, **12**:287-290.
- [9] Sims J T, Maguire R O, Leyten A B, *et al.* Evaluation of Mehlich 3 as an agri-environmental soil phosphorus test for the mid Atlantic United States of America[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, **66**: 2016-2032.
- [10] Maguire R O, Sims J T. Soil testing to predict phosphorus leaching[J]. *J Environ Qual*, 2002a, **31**: 1601-1609.
- [11] Maguire R O, Sims J T. Measuring agronomic and environmental soil phosphorus saturation and predicting phosphorus leaching with Mehlich-3[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2002b, **66**: 2033-2039.
- [12] Elliott H A, O' Connor G A, Brinton S. Phosphorus leaching from biosolids-amended sandy soils[J]. *J Environ Qual*, 2002, **31**: 681-689.
- [13] Tomer M D, Schipper L A, Knowles S K, *et al.* A land-based system for treatment of municipal wastewater at Whakarewarewa Forest [S]. Rotorua: New Zealand FRI Bulletin 199, New Zealand Forest Research Institute, 1997. 28.
- [14] Tozer W, Wilkins K J, Wang H, *et al.* Using ¹⁵N to determine a budget for effluent-derived nitrogen applied to forest [J]. *Isot Environ Health Stud*, 2005, **41**: 13-30.
- [15] McLay C D A, Tomer M D, Hopkins K M, *et al.* Chemical changes in a volcanic forest soil after four years of effluent irrigation[A]. NZ Land treatment collective: proceedings of the technical session, 2000. 79-90.
- [16] Murphy J, Riley J P. A notified single solution method for the determination of phosphate in nature water[J]. *Anal Chim Acta*, 1962, **27**: 31-36.
- [17] Blakemore L C, Searle P L, Daly B K. Methods for chemical analysis of soils[M]. Lower Hutt, New Zealand: New Zealand Soil Bureau Scientific Report 80, 1987.
- [18] Su J, Wang H, Beecroft K, *et al.* Fractionation and mobility of phosphorus in a sandy forest soil amended with biosolids[A]. NZ Land treatment collective: proceedings for the 2006 Annual conference, 2006. 216-225.
- [19] Olsen S R, Cole C V, Watanabe F S, *et al.* Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate [S]. Washington, DC: US Department of Agriculture, 1954. 19.
- [20] Mehlich A. Mehlich No. 3 soil test extractant: a modification of Mehlich No. 2 extractant[J]. *Comm Soil Sci Plant Anal*, 1984, **15**: 1409-1416.
- [21] 邵兴华,张建忠,洪森荣. 土壤中影响磷吸附因素研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2007, **35**(12):3609-3611.
- [22] 姜应和,周莉莉,彭秀英. 铅在土壤中的形态及其植物毒性研究概况[J]. *草原与草坪*, 2004, **106**(3):16-19,32.
- [23] Kleinman P J A, Sharpley A N. Estimating soil phosphorus sorption saturation from mehlich-3 data[J]. *Soil Sci Soc Plant Anal*, 2002, **33**: 1825-1839.
- [24] Kleinman P J A, Needelman B A, Sharpley A N, *et al.* Using soil phosphorus profile data to assess phosphorus leaching potential in manured soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, **67**: 215-224.
- [25] Wang H, Hedley M J, Bolan N S, *et al.* The influence of surface incorporated lime and gypsiferous by-products on surface and

- subsurface soil acidity. I. Soil solution chemistry[J]. Aust J Soil Res, 1999, **37**: 165-180.
- [26] McDowell R W, Sharpley A N, Brookes P, *et al.* Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution [J]. Soil Sci, 2001, **166**: 137-149.
- [27] Higgs B, Johnston A E, Salter J L, *et al.* Some aspects of achieving sustainable phosphorus use in agriculture [J]. J Environ Qual, 2000, **29**: 80-87.
- [28] Nair V D, Portier K M, Graetz D A, *et al.* An environmental threshold for degree of phosphorus saturation on sandy soils[J]. J Environ Qual, 2004, **33**: 107-113.
- [29] 丁竹红, 胡忻, 郭红岩. 用通用浸提剂 Mehlich3 研究城市污泥重金属生物有效性[J]. 环境污染与防治, 2006, **28**(7): 485-487, 525.
- [30] 庞洁, 韦真, 沈方科. Mehlich 3 法与常规分析方法在测定土壤有效 P、K 的比较研究[J]. 广西农业生物科学, 2008, **27**(增): 69-71.
- [31] Perrott K, Hawke M, Kear M, *et al.* Phosphorus movement down the soil profile at the Whakarewarewa effluent irrigation scheme and the expected premoval lifetime of the scheme[R]. NZ Land treatment collective: proceedings for the 2002 annual conference: 120-125.
- [32] Hu C, Zhang T C, Huang Y H, *et al.* Effects of long-term wastewater application on chemical properties and phosphorus adsorption capacity in soils of a wastewater land treatment system [J]. Environ Sci Technol, 2005, **39**: 7240-7245.