

# 污水灌溉对林地土壤中磷的数量与形态影响\*

胡慧蓉<sup>1,2</sup> 王海龙<sup>2</sup> Katie Beecroft<sup>2</sup> Mark Kimberley<sup>2</sup>

(1 西南林业大学环境科学与工程学院, 昆明 650224)

(2 Ensis, Private Bag 3020, Rotorua, New Zealand)

**摘要** 为避免城市生活污水携带的 N、P 进入水体, 新西兰罗托鲁阿市处理后的污水直接喷灌至 Whakarewarewa 森林, 同时建立污水灌溉林地处理系统长期定位试验地, 以评价林地生态系统对污水携带营养物质的同化能力。为了解长期污水灌溉对土壤中 P 的数量、形态、环境的影响, 对该灌溉系统中的土壤进行了剖面采样分析。结果表明: 土壤 TP(全磷)、Olsen P、M3P(Mehlich-3 P) 在所有灌溉区的表层土壤(0~10 cm) 均有显著( $p < 0.05$ ) 增加, 部分指标的显著增加达深层土壤。随灌溉进入土壤的 P 大多被保存在上层土壤(0~40 cm) 中。土壤中各形态的磷所占比例因长期污水灌溉而改变, 灌溉前占优势的 NaOH P<sub>o</sub>(以 NaOH 浸提得到的有机磷) 经长期灌溉后被 NaOH P<sub>i</sub>(以 NaOH 浸提得到的无机磷) 所取代, 上层土壤 WSP(水溶性磷, Water-soluble P) 变化明显。以 Olsen P 60 mg kg<sup>-1</sup> 和 M3P 150 mg kg<sup>-1</sup> 为环境临界值可预测土壤剖面中 P 的淋失危机, WSP 可望成为适用更广的土壤 P 淋失环境危机预测指标。

**关键词** 污水灌溉; 磷的形态; 磷的淋失; 环境临界值

**中图分类号** S141.8; S714 **文献标识码** A

近来, 为缓解水资源紧缺并实现城市生活污水的再生利用, 许多国家尝试将经初步处理的城市生活污水土地灌溉。由于污水中含有大量植物所需营养成分, 接受长期污水灌溉的土壤养分含量与分布必然发生变化。通常, 确定土地灌溉系统的灌溉定额往往以土壤渗透性或植物对氮(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他营养元素过量供应和土壤积累, 其中包括引起水体富营养化的磷(P)<sup>[1]</sup>。土壤对 P 的吸持能力有限并受土壤特性的影响, 当 P 大量进入土壤而使土壤对 P 的吸持达到饱和, 过量的 P 将被释放淋失<sup>[1-2]</sup>。因此, 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长期运行的主要限定因子<sup>[3]</sup>。近年来, 为监测因灌溉或施肥等措施进入土壤的 P 的动态, 预测因土壤中的 P 进入地表/地下水而可能引发的水体富营养化潜在危机, 一些新的研究方法和评价参数不断产生, 如: 土壤长期定位观测、土壤剖面分析、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)、M3P 饱和率(Mehlich-3 P Saturation ratio,

M3PSR)、P 的连续分级(Sequential fractionation of phosphorus) 等<sup>[4-10]</sup>。研究结果为更好地理解 P 的土壤剖面分布与转化、饱和与淋失、环境潜在危机等奠定了基础。

新西兰北岛罗托鲁阿(Rotorua) 市, 由于长期将经二次处理后的城市生活污水直接排入 Rotorua 湖, 导致湖水有富营养化和蓝藻繁殖趋势。为缓解环境压力, 同时将城市生活污水资源化利用, 1991 年在 Whakarewarewa 林区布设了一个土壤-水-植物土地处理系统林地长期喷灌定位试验。借助土壤的吸收净化能力, 实现净化水质和补充林地土壤养分的同时, 对系统中林木、土壤、下渗水等因子作同步监测。初期研究表明, 流经土地处理系统进入 Rotorua 湖的溪流中净 N、P 量与直接排放的污水相比明显减少<sup>[11]</sup>, 其中 N 含量逐年增加, P 含量变化不大<sup>[12]</sup>。但对随水进入土壤的 P 的迁移转化缺乏了解, 因此很难判断灌溉是否对水体构成威胁。为明确灌溉后土壤中 P 的积累、迁移与淋失可能性, 本研究借助国际上监测 P 环境危机的最新研究方法, 对灌溉系统中土壤 P 的形态与含量进行测定, 分析土壤剖面中 P 的淋失可能性, 为城市生

\* 西南林业大学水土保持与荒漠化防治重点学科(XKX200905)、国家留学基金委西部项目(500003) 资助

作者简介: 胡慧蓉(1964—), 女, 教授, 主要研究方向为土壤与恢复生态。E-mail: hhr3862153@yahoo.cn

收稿日期: 2010-11-26; 收到修改稿日期: 2011-06-10

活污水的林地长期灌溉利用是否引发环境问题的进一步研究提供科学依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于新西兰北岛罗托鲁阿市 Waipa 流域的 Whakarewarewa 林区商用辐射松林地。土壤为火山灰土, 大孔隙多、渗透性好(饱和导水率  $>45 \text{ mm h}^{-1}$ ), 几乎无径流<sup>[11]</sup>。罗托鲁阿平均降水量  $1491 \text{ mm a}^{-1}$ , 平均蒸发量  $1186 \text{ mm a}^{-1}$ 。

试验以长期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, Control)、37 (低, Low)、71 (标准, Middle)、112 (高, High)  $\text{mm 周}^{-1}$ 。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) 组成。

1991 年 10 月 ~ 1995 年 12 月期间污水处理厂输出端检测数据显示(表 1), 灌溉污水中总磷浓度平均为  $3.1 \text{ mg L}^{-1}$ , 变化范围  $0.4 \sim 9.0 \text{ mg L}^{-1}$ <sup>[13]</sup>。以此数据为依据, 截止 2002 年 6 月(灌溉 128 个月)随污水进入土壤的 P 累计总量约: 对照区 0、低灌溉区 605 (以中等灌溉率的 0.52 倍计)、中灌溉区 1163、高灌溉区 1837  $\text{kg hm}^{-2}$  (以中等灌溉率的 1.58 倍计)。

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

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

组成成分 Composition	N	P	Ca	Mg	K	Na
浓度 Concentration ( $\text{mg L}^{-1}$ ) <sup>2)</sup>	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 Annual application ( $\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )	399	109	282	36	439	1999

注: 1) 年均用量 ( $\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) 指中等灌溉率  $71 \text{ mm 周}^{-1}$  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。2) 括号内数值为灌溉污水中各营养成分的浓度范围 Note: 1) Annual application rate ( $\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) refers to the amount of nutrients brought into the soil annually in a plot moderate in irrigation rate, being  $71 \text{ mm week}^{-1}$ . It is 1.58 times in a plot high in irrigation rate and 0.52 times in a plot low in irrigation rate as much as in the former. 2) Values in brackets are concentration ranges of nutrients in irrigation effluent

### 1.2 样品采集与分析

**1.2.1 样品采集** 灌溉 11 年后对土壤样品采集。以内径 30 mm 的土钻在各灌溉区内多点混合采样, 采样深度分别为: 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 和 60 ~ 100 cm, 样品经风干、磨细过 2 mm 筛, 保存备用。

**1.2.2 土壤分析** 在  $105^\circ\text{C}$  下烘干测定土壤吸湿水; 全磷 (TP) 以半微量凯氏法消解<sup>[14-15]</sup>; 有效磷分别采用 Olsen 法 (Olsen P)<sup>[16]</sup>、Mehlich-3 (M3) 法 (M3P)。其中, M3P 的测定为 Mehlich 3 浸提液按 1:10 土液比浸提土壤, ICP-OES (Perkin Elmer Optima 3000DV) 测定浸提液中的 P (M3P)<sup>[17]</sup>, 其余各待测液中 P 的含量以抗坏血酸还原—钼兰比色法<sup>[18]</sup>测定。

**1.2.3 土壤中各形态磷的分级测定** 采用由 Sui 等对 Hedley 法<sup>[4]</sup>修改后的分级方法<sup>[19]</sup>:

(1)  $1 \text{ g}$  土壤样品分别被  $30 \text{ ml}$  的以下浸提剂连续浸提: ① 去离子水浸提水溶性磷 (WSP); ②  $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$  (pH 8.2) 浸提生物有效

性磷 ( $\text{NaHCO}_3 \text{ P}_i$ ); ③  $0.1 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaOH}$  浸提与 Al-和 Fe-结合的磷 ( $\text{NaOH P}_i$ ); ④  $1.0 \text{ mol L}^{-1} \text{ HCl}$  提取 Ca-和 Mg-结合的磷 ( $\text{HCl P}$ )<sup>[20]</sup>, 各振荡 16 h, 离心待测;

(2) 以  $\text{NaHCO}_3$  与  $\text{NaOH}$  获得的浸提液中 TP 在 APHA (1998) 的半微量凯氏过程后测定<sup>[15]</sup>, 浸提液中有机磷 ( $\text{NaHCO}_3 \text{ P}_o$  和  $\text{NaOH P}_o$ ) 通过 TP 和无机磷 ( $\text{P}_i$ ) 之差值计算得到;

(3) 土壤残渣中磷 (Residual P) 的测定与土壤 TP 的方法相同;

(4) 以上各浸提液中所有形态的磷含量均采用抗坏血酸-钼兰比色法测定获得<sup>[18]</sup>;

(5) 各形态磷的含量之和为土壤总磷 (Soil TP of various fractions, TFP), 各形态磷的质量分数为其含量与 TFP 之比。

### 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 污水灌溉对土壤全磷与有效磷的影响

表 2 显示污水灌溉对 TP 与有效磷含量的影响较大。与对照相比,灌溉区土壤 TP 含量在 0~40 cm 土层中均明显增加,且表土(0~10 cm)增加达显著性水平( $p < 0.05$ ),高灌溉区显著性( $p < 0.05$ )

增加达深层(40~60 cm)土壤。有效磷浓度随 TP 的增加而有一致的趋势,Olsen P 的显著性( $p < 0.05$ )增加达各灌溉区的亚表土(10~20 cm)与高灌溉区的深层土(40~60 cm)。各灌溉区土壤的 M3P 浓度在表层(0~10 cm)显著( $p < 0.05$ )增加,中、高灌溉区的显著性( $p < 0.05$ )增加达亚表土(10~20 cm)。结果表明,受长期污水灌溉的土壤 TP、有效磷在上层土壤中均明显积累。

表 2 污水灌溉对土壤磷的影响

Table 2 Effects of effluent irrigation on phosphorus of the soils ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

处理 Treatment	0~10 cm			10~20 cm			20~40 cm			40~60 cm			60~100 cm		
	TP	Olsen P	M3P	TP	Olsen P	M3P	TP	Olsen P	M3P	TP	Olsen P	M3P	TP	Olsen P	M3P
对照 Control	292b	3.3b	12.0b	244b	2.2b	6.4b	182b	1.3b	2.6a	162b	1.5b	1.3a	165a	0.9a	0.6a
低灌溉区 Low	862a	66.6a	166.0a	494ba	26.4a	46.0ba	248ba	2.7b	2.3a	213ba	1.3b	0.9a	184a	1.3a	0.6a
中灌溉区 Middle	1067a	92.7a	289.0a	830ba	60.3a	160.0a	372ba	13.3ba	19.0a	223ba	1.9b	1.2a	177a	1.3a	0.3a
高灌溉区 High	1106a	93.6a	298.0a	984a	72.2a	187.0a	703a	38.7a	74.0a	316a	7.1a	6.7a	258a	3.3a	2.8a

注:表列中同一深度数值后所带不同字母表示显著性差异在  $p < 0.05$ ,  $n = 60$  Note: Different letters affixed to the data, the same in both soil depth and mean significant difference at  $p < 0.05$ ,  $n = 60$

### 2.2 污水灌溉对土壤中磷形态的影响

表 3 是根据土壤磷的分级所得各形态含量及其占总量比例。TFP 为各形态磷的数量总和,数值较 TP 略高,其显著性增加与 TP 一致,TFP 与 TP 两者间具有很高相关性( $R^2 = 0.97^*$ ,  $n = 60$ )。

**2.2.1 土壤中磷的形态** 依照 Hedley 的连续分级法<sup>[4]</sup>得到的土壤各形态磷中,WSP 与  $\text{NaHCO}_3 \text{ P}_i$  为可溶的活性磷(Soluble P, S-P),NaOH P 为 Al-、Fe-结合态磷,HCl P 为 Ca-、Mg-结合态磷<sup>[20]</sup>。后两种形态的磷(NaOH P, HCl P)均为潜在的生物可利用磷,它们的有效性为:Ca-P 与 O-P(Occluded P, 闭蓄态磷) < Fe-P < Al-P < S-P。由  $\text{NaHCO}_3$  浸提得到的  $\text{NaHCO}_3 \text{ P}_i$  为快速矿化分解的有机磷,由 NaOH 浸提得到的 NaOH P<sub>i</sub> 则为分解稍慢的潜在生物有效磷<sup>[21]</sup>。未被酸碱试剂提取的残渣磷,是与土壤中 Ca、Mg、Fe、Al 等离子牢固结合,生物难以利用的磷。

#### 2.2.2 污水灌溉对土壤中无机形态磷的影响

试验区土壤剖面中各无机形态磷的含量均有随土壤深度渐低的趋势,呈明显的土壤剖面性。与对照相比,经长期污水灌溉后土壤 WSP、 $\text{NaHCO}_3 \text{ P}_i$ 、NaOH P<sub>i</sub>、HCl P 在低灌溉区表土(0~10 cm)有显著增加。高灌溉区 WSP 与 HCl P 的显著增加达深层

土(20~40 cm), $\text{NaHCO}_3 \text{ P}_i$  与 NaOH P<sub>i</sub> 的显著性增加达深层 40~60 cm,中灌溉区的变化介于低、高灌溉区之间,总体上灌溉率与各形态磷的增加成正比相关。

对照中 TFP 较低,表土层稍高达  $306 \text{ mg kg}^{-1}$ 。各无机形态磷含量也相对较少,WSP、 $\text{NaHCO}_3 \text{ P}_i$ 、NaOH P<sub>i</sub>、HCl P 的质量浓度按顺序为:1.0、6.9、66.5 和  $31.7 \text{ mg kg}^{-1}$ ,分别占总量的 0.3%、2.2%、21.7% 和 10.3%,NaOH P<sub>i</sub> 具明显优势。相比之下,灌溉区表土(0~10 cm)TFP 高出对照 3~4 倍,各无机形态磷的质量浓度更增加明显。WSP、 $\text{NaHCO}_3 \text{ P}_i$ 、NaOH P<sub>i</sub> 与 HCl P 在总量中的质量分数变动在 2.7%~4.2%、12.4%~14.1%、46.3%~52.7% 与 9.6%~11.1% 范围,NaOH P<sub>i</sub> 由原来总量的 20% 升至 50%,其优势进一步加强。同时,活性磷所占比例也有明显提高,HCl P 的质量分数基本没变。亚表土(10~20 cm)中 TFP 与各无机形态磷的变化与表层相似,但数值上变幅相对较小,所占的质量分数活性磷略有减少,NaOH P<sub>i</sub> 有所增加。以上变化在 20~40 cm 及以下的土层中逐渐减缓,到底土层时基本与对照相当。总之,长期污水灌溉既增加了表土各无机形态磷的数量,也改变了它们的比例。

表 3 灌溉区土壤剖面中各形态磷的含量及其占 TFP 的质量分数

Table 3 Contents and proportions of soil P fractions at different depths

处理 Treatment	土层深度 Soil depth (cm)	含量(质量分数) Content (Proportion) (mg kg <sup>-1</sup> )(%)							TFP	
		WSP	NaHCO <sub>3</sub> P <sub>i</sub>	NaHCO <sub>3</sub> P <sub>o</sub>	NaOH P <sub>i</sub>	NaOH P <sub>o</sub>	HCl P	Residual P		
对照 Control	0 ~ 10	1.0b (0.3)	6.9b (2.2)	32.3a (10.5)	66.5b (21.7)	101.3a (33.3)	31.7b (10.3)	66.1b (21.5)	306b	
低灌溉区 Low		26.8a (2.7)	116.0a (12.4)	13.1a (1.5)	417.6a (46.3)	152.8a (16.0)	90.1a (9.6)	106.1ba (11.4)		923a
中灌溉区 Middle		49.1a (3.8)	181.3a (14.1)	12.8a (1.2)	673.2a (52.7)	114.2a (8.8)	130.9a (10.2)	118.4a (9.2)		
高灌溉区 High	10 ~ 20	48.1a (4.2)	169.5a (14.0)	8.5a (0.8)	606.0a (48.7)	137.7a (11.2)	134.4a (11.1)	118.5a (10.0)	1 223a	
对照 Control		0.5b (0.2)	3.8b (1.3)	19.9a (7.3)	68.0b (24.1)	124.3a (44.1)	17.1b (6.1)	47.5a (16.9)		281b
低灌溉区 Low		4.9ba (0.9)	38.5a (6.8)	15.2a (3.6)	235.2ba (45.2)	99.9a (21.6)	42.7ba (7.9)	68.0a (14.1)		
中灌溉区 Middle	20 ~ 40	20.4a (1.9)	111.1a (11.1)	14.5a (2.2)	540.8a (57.3)	82.9a (9.3)	73.1ba (7.8)	86.1a (10.5)	929ba	
高灌溉区 High		25.1a (2.5)	125.5a (12.0)	5.5a (0.5)	624.8a (59.1)	87.6a (8.2)	99.0a (9.4)	87.2a (8.3)		1 055a
对照 Control		0.2b (0.1)	1.9b (0.8)	13.7a (5.8)	53.8b (22.7)	118.3a (50.1)	11.6b (5.0)	36.1a (15.4)		
低灌溉区 Low	40 ~ 60	0.7b (0.3)	3.7b (1.4)	12.7a (4.7)	72.4b (26.5)	104.5a (39.1)	18.0b (6.8)	60.2a (21.3)	272a	
中灌溉区 Middle		1.3ba (0.3)	19.1ba (4.2)	12.6a (3.5)	168.9ba (41.2)	89.2a (24.0)	33.5ba (8.6)	68.1a (18.2)		393a
高灌溉区 High		7.3a (0.8)	73.6a (8.8)	6.8a (1.6)	434.4a (56.8)	83.9a (11.7)	60.2a (8.1)	80.3a (12.1)		
对照 Control	60 ~ 100	0.2a (0.1)	1.3b (0.7)	10.4a (5.5)	41.8b (22.1)	86.7a (46.4)	11.0a (5.7)	36.9a (19.4)	188b	
低灌溉区 Low		0.4a (0.2)	1.5b (0.7)	9.2a (4.2)	50.7b (22.8)	89.7a (41.7)	16.5a (7.5)	51.9a (23.0)		220ba
中灌溉区 Middle		0.4a (0.2)	2.5b (1.2)	9.2a (4.4)	58.6ba (27.9)	69.9a (33.2)	23.8a (11.2)	46.0a (21.9)		
高灌溉区 High	60 ~ 100	0.8a (0.2)	12.2a (3.6)	10.5a (3.4)	129.8a (39.2)	80.6a (26.8)	27.1a (8.4)	56.9a (18.5)	318a	
对照 Control		0.2a (0.1)	1.0a (0.5)	9.7a (5.2)	39.9a (21.8)	84.4a (45.6)	11.2a (6.0)	39.5a (20.8)		186a
低灌溉区 Low		0.3a (0.1)	0.9a (0.5)	7.4a (4.0)	39.7a (20.0)	82.6a (44.5)	13.6a (7.1)	47.1a (23.8)		
中灌溉区 Middle	60 ~ 100	0.5a (0.2)	1.1a (0.6)	6.6a (3.2)	53.6a (26.3)	84.5a (41.2)	17.2a (8.4)	41.3a (20.2)	205a	
高灌溉区 High		0.3a (0.1)	4.1a (1.4)	6.7a (3.0)	72.9a (28.0)	95.2a (40.0)	19.4a (7.9)	46.8a (19.5)		245a

注:表列中同一深度数值后所带不同字母表示显著性差异在  $p < 0.05$ ,  $n = 60$  Note: Different letters affixed to the data the same in soil depth mean significant difference at  $p < 0.05$ ,  $n = 60$

### 2.2.3 污水灌溉对土壤中有有机形态磷的影响

灌溉未对土壤有机磷产生显著影响(表3)。对照区表土的  $\text{NaHCO}_3 \text{ P}_o$  含量  $32.3 \text{ mg kg}^{-1}$  较高,随剖面向下逐渐减少,底土仅  $9.7 \text{ mg kg}^{-1}$ 。 $\text{NaOH P}_o$  在亚表土含量最高( $124.3 \text{ mg kg}^{-1}$ ),向下渐减至底土层为  $84.4 \text{ mg kg}^{-1}$ 。与含量相比,各有机磷在总量的质量分数变化稍微明显。其中, $\text{NaOH P}_o$  的质量分数由表层 33.3% 升至 20~40 cm 土层 50.1% 后,又逐渐降到底土 45.6% 的表现。综合起来看,各灌溉区土壤中有有机磷( $\text{NaHCO}_3 \text{ P}_o + \text{NaOH P}_o$ ) 所占比例均明显降低,并与灌溉率和土层深度呈负相关。这可能与灌溉增加了土壤湿度与营养元素,促进了微生物活动有关。这个促进可能也是活性磷增加的主要原因之一。

### 2.2.4 污水灌溉对土壤中残渣磷和磷总量的影响

对照区土壤残渣磷含量由表土  $66.1 \text{ mg kg}^{-1}$  逐渐降到底土层的  $39.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ,其占总量的质量分数:表土 21.5%,10~40 cm 土层稍低,底土层约 20%,从上到下小有起伏。经长期灌溉后,其含量在各层土壤中均有少量增加,并在高灌溉区表土达显著性变化。而质量分数则是由表土层的约 10% 逐渐增加,到底土层的约 20%。残渣磷与其他形态磷相比增加微弱,暗示因灌溉进入土壤的磷被土壤固定失效的数量是有限的。

所有灌溉区表土、亚表土 TFP 均明显增加,显著性水平出现在所有灌溉区的表土层,以及高灌溉区的亚表土层。高灌溉区 20~40 cm 土层的 TFP 约为对照的 3 倍,而各灌溉区底土的 TFP 增加不大,同样表明了灌溉污水中携带的磷进入土壤后主要被保存在土壤上层。

## 3 讨论

### 3.1 土壤磷与污水灌溉系统期限

本污水灌溉土地处理系统以该区火山灰土中三水铝石含量、土壤磷吸附曲线、及对土壤磷吸持饱和度的测算为依据,最初确定系统的灌溉期限为 70~130 a<sup>[11]</sup>。然而有研究显示,经过长期的污水灌溉,系统内土壤 pH 已由原来的酸性变为近中性<sup>[22]</sup>,这无疑将影响到土壤对磷的吸持与解吸过程,并使以磷为限制因子制定的该土地处理系统的预期期限估测复杂化。因此,对系统内土壤、下渗水与溪流中的磷进行动态监测,进一步校正灌溉期限很有必要。

### 3.2 污水灌溉系统中磷淋失危机的指标

长期污水灌溉后土壤 TP、Olsen P、M3P 浓度显著( $p < 0.05$ )增加。近年来根据对不同质地土壤及其地下水中磷的监测研究表明,Olsen P 含量  $60 \text{ mg kg}^{-1}$  和 M3P 含量  $150 \text{ mg kg}^{-1}$  (对弱酸砂质土壤)均是较好的预测土壤剖面中磷的潜在淋失环境临界指标<sup>[5,7]</sup>。据此判断,本污水灌溉土地处理系统内上层土壤中显著增加的有效磷已有淋失趋势<sup>[22]</sup>。Falkiner 等<sup>[23]</sup> 研究报道,污水灌溉 5 年后,69% 的土壤有机磷转换为无机磷是导致土壤全剖面无机磷浓度升高的原因之一,因此他建议将有机磷含量变化作为预测污水灌溉系统中磷淋失危机的一个指标。本研究数据(表3)显示了相似的变化趋势,灌溉使土壤上层有机磷表现非显著性降低,而无机磷(尤其活性磷)相应增加,这或许就是长期灌溉引起土壤磷向下淋失的一个信号。因此,有必要考虑将土壤有机磷的变化纳入系统中磷淋失危机的指标体系。

### 3.3 WSP 可作为土壤磷淋失危机的便捷指标

有研究报道,Olsen P、NaOH P 和土壤磷饱和度可用来综合评价长期施肥下黄壤旱地磷对水环境的潜在影响<sup>[24]</sup>,Kleinman 等<sup>[25]</sup> 认为,WSP 的升高预示着土壤吸持的磷有被解吸和随水下移的潜在可能。表3数据显示,经长期灌溉后土壤中 NaOH P ( $\text{NaOH P}_i + \text{NaOH P}_o$ ) 的数量和质量分数均占有绝对优势。但上层土壤数值与对照相比增长倍数最大且变幅最大的却是 WSP,因此 WSP 作为一个参照指标以预示土壤中磷淋失危机是可行的。虽 Olsen P 与 M3P 作为土壤磷淋失危机环境指标已有确切的临界值,但对 Olsen P 与 M3P 的测定有相应的土壤 pH 要求,将酸碱性不一的土壤进行 Olsen P 与 M3P 的比较显然不太合理。其他的磷淋失指标如有机磷、NaOH P、土壤磷饱和度等的测定相对不易,但 WSP 测定简便易行。本研究中土壤上层快速增加的 WSP 与 Olsen P 间存在较高的线性相关( $R^2 = 0.87^*$ ,  $n = 60$ )。因此,发展以 WSP 为可广泛使用的土壤磷淋失环境危机预测指标的研究工作将使土壤磷淋失预测工作更为便捷。

## 4 结论

1) 所有灌溉区土壤的 TP 与 TFP、Olsen P 和 M3P 在表层显著增加,随污水进入土壤的磷主要保存在上层土壤(0~40 cm)中。Olsen P 与 M3P 含量在中、高灌溉区的 0~20 cm 土层中均超过了 Olsen

P 60 mg kg<sup>-1</sup>或 M3P 150 mg kg<sup>-1</sup>的环境临界水平, 土壤中的磷有随水向下淋失的潜在危机。

2) 长期污水灌溉改变了上层土壤中各形态磷在总量中所占比例, 灌溉前占优势的 NaOH P<sub>o</sub> 相对减低, NaOH P<sub>i</sub> 成为占统治地位的形态, 活性磷 (WSP 与 NaHCO<sub>3</sub> P<sub>i</sub>) 增加显著。

3) Olsen P 60 mg kg<sup>-1</sup>与 M3P 150 mg kg<sup>-1</sup>均是国际上衡量土壤中磷是否具有潜在淋失危机的指标, 有机磷、NaOH P 等均可用来进行系统中土壤磷淋失环境评价指标, 相比之下, WSP 可能成为适用更广的土壤磷淋失环境危机预测指标。

**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. *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 Environ Qual*, 2006, 35:207—215
- [ 3 ] USEPA. Process design manual - Land treatment of municipal wastewater. EPA 625/-81-013 (COEEM 1110-1-501). Center for Environmental Research Information. USEPA, Cincinnati, OH, USA. 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. *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 Environ Qual*, 1995, 24:904—910
- [ 6 ] Snyder C S, Bruulsema T W, Sharpley A N, et al. Site specific management guidelines: Site-specific use of the environmental phosphorus-index concept//Site Specific Management Guidelines SSMG-1. Potash and Phosphate Institute, Norcross, GA, 1999
- [ 7 ] 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. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, 66: 2 016—2 032
- [ 8 ] Maguire R O, Sims J T. Soil testing to predict phosphorus leaching. *J Environ Qual*, 2002, 31: 1 601—1 609
- [ 9 ] Maguire R O, Sims J T. Measuring agronomic and environmental soil phosphorus saturation and predicting phosphorus leaching with Mehlich-3. *Soil Sci Soc Am J*, 2002, 66: 2 033—2 039
- [ 10 ] Elliott H A, O'Connor G A, Brinton S. Phosphorus leaching from biosolids-amended sandy soils. *J Environ Qual*, 2002, 31:681—689
- [ 11 ] Tomer M D, Schipper L A, Kowles S K, et al. A land-based system for treatment of municipal wastewater at Whakarewarewa Forest. *New Zealand FRI Bulletin* 199, New Zealand Forest Research Institute, Rotorua, 1997: 28
- [ 12 ] Tozer W, Wilkins K J, Wang H, et al. Using <sup>15</sup>N to determine a budget for effluent-derived nitrogen applied to forest. *Isot Environ Health Stud*, 2005, 41:13—30
- [ 13 ] 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//NZLT collective: Proceedings of the technical session, 2000, 21:79—90
- [ 14 ] Blakemore L C, Searle P L, Dlay B K. Methods for chemical analysis of soils; NZ soil bureau scientific report. 1987:80—103
- [ 15 ] Su J, Wang H, Beecroft K, et al. Fractionation and mobility of phosphorus in a sandy forest soil amended with biosolids//NZLT collective: Proceedings for the 2006 Annual conference, 2006: 216—225
- [ 16 ] Olsen S R, Cole C V, Watanabe F S, et al. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. US Department of Agriculture, Washington, DC, 1954: 19
- [ 17 ] Mehlich A. Mehlich No. 3 soil test extractant: A modification of Mehlich No. 2 extractant. *Comm Soil Sci Plant Anal*, 1984, 15: 1 409—1 416
- [ 18 ] Murphy J, Riley J P. A notified single solution method for the determination of phosphate in nature water. *Anal Chim Acta*, 1962, 27:31—36
- [ 19 ] Sui Y B, Thompson M L, Shang C. Fractionation of phosphorus in Mollisol amended with biosolids. *Soil Sci Soc Am J*, 1999, 63:1 174—1 180
- [ 20 ] Sharpley A N, McDowell R W, Kleinman P J A. Amounts, forms and solubility of phosphorus in soils receiving manure. *Soil Sci Soc Am J*, 2004, 68: 2 048—2 057
- [ 21 ] Maguire R O, Sims J T, Coale F J. Phosphorus fractionation in biosolids-amended soils: Relationship to soluble and desorbable phosphorus. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64: 2 018—2 024
- [ 22 ] 胡慧蓉, 王海龙, Kimberley M. 长期污水灌溉后林地土壤中磷的含量与移动. *环境科学*, 2010, 31(8):1 951—1 958. Hu H R, Wang H L, Kimberley M. Contents and movement of phosphorus in soil of long term effluent irrigated land forest (In Chinese). *Environmental Science*, 2010, 31(8):1 951—1 958
- [ 23 ] Falkiner R A, Polglase P J. Fate of applied phosphorus in an effluent-irrigated Pinus radiata plantation. *Aust J Soil Res*, 1999, 37:1 095—1 106
- [ 24 ] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 等. 长期施肥下黄壤旱地磷对水环境的影响及其风险评价. *土壤学报*, 2003, 40(6): 838—844. Liu F, Huang C Y, He T B, et al. The environmental impact of phosphorus on water by a long-term applying fertilizer P in the upland fields Of yellow soil areas and its risks evaluation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 838—844
- [ 25 ] 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. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, 67:215—224

## EFFECT OF LONG TERM EFFLUENT IRRIGATION ON CONTENT AND MOVEMENT OF PHOSPHORUS IN SOIL OF FOREST LAND

Hu Huirong<sup>1,2</sup> Wang Hailong<sup>2</sup> Katie Beecroft<sup>2</sup> Mark Kimberley<sup>2</sup>

(1 *Environment Science and Engineering College, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China*)

(2 *Ensis, Private Bag 3020, Rotorua, New Zealand*)

**Abstract** In New Zealand, to avoid the risk of urban sewage bringing N and P into Lake Rotorua, Rotorua city sprays treated sewage direct into Whakarewarewa Forest as irrigation and to evaluate capacity of the forest ecosystem of assimilating the nutrients brought in with the irrigation, a long term field experiment on sewage irrigation of forest land has been established and carried out. To understand effects of long term sewage irrigation on content and form of soil P, and on the environment, soil samples were collected from the system for analysis. Results show that soil TP (total phosphorus), Olsen P, M3P (Mehlich-3 P) all increased significantly ( $p < 0.05$ ) in the top soil (0 ~ 10 cm) in all the effluent treated plots as compared with the control plots and some even in the 20 ~ 40 cm or deeper soil layer. Most of the P brought in with the irrigation accumulated in the top 40 cm soil. Fractionation of soil P changed due to long term effluent irrigation. NaOH P<sub>o</sub> (organic P extracted by NaOH) was replaced by NaOH P<sub>i</sub> (inorganic P extracted by NaOH) in dominance. Significant change in WSP (water soluble P) was observed in top soil. To set measurement value 60 mg kg<sup>-1</sup> Olsen P (measured value) and 150 mg kg<sup>-1</sup> for M3P as environment thresholds enables prediction of the risk of P leaching, and WPS may be a better indicator of environmental crisis of P leaching and applicable to more soils.

**Key words** Effluent irrigation; Forms of phosphorus; Phosphorus leaching; Environment threshold level