

黄土高原旱地长期施肥条件下土壤有机磷的变化

来璐^{1,2} 郝明德² 彭令发² 张振明²

(1 西北农林科技大学资源环境学院 陕西杨凌 712100; 2 中国科学院水利部水土保持研究所 陕西杨凌 712100)

摘要 采用 Bowman 和 Cole 提出的有机 P 分组方法,对长期施肥条件下土壤有机 P 的组成变化以及有机 P 及其组分与有机质、速效 P 的关系进行研究。结果表明,活性、中等活性、中等稳定性、高等稳定性有机 P 分别占有有机 P 总量的 80.2%、9.8%、9.0%、和 2.0%。有机无机肥配施可明显增加土壤有机 P 及活性、中等活性有机 P、中等稳定性有机 P 含量,减少高等稳定性有机 P 含量。施肥对有机 P 各组分剖面分布规律影响不大。活性、中等活性有机 P 与速效 P、有机质、有机 P 总量呈显著正相关,中等稳定性、高等稳定性有机 P 与速效 P、有机质不相关。

关键词 旱地;长期施肥;有机 P 组分

中图分类号 S153

土壤 P 素可分为有机 P 和无机 P 两大类,两者都是植物吸收利用的重要 P 源^[1]。土壤中无机 P 与有机 P 可相互转化,无机 P 被生物固定形成有机 P,有机 P 通过土壤磷酸酶的作用转化为无机 P 被作物吸收利用^[2],因此,有机 P 在 P 的生物循环中起着重要的作用。关于土壤无机 P 的性质及各组分的形态变化,已积累了大量的资料^[3-5],而土壤有机 P 组分与土壤供 P 能力等问题并不完全清楚。自从 1978 年 Bowman RA 和 Cole CV 首次提出土壤有机 P 分组测定方法后^[6],国内对有机 P 的研究明显增多^[7,8],但对长期施肥条件下有机 P 组分变化,以及

有机 P 各组分与速效 P、有机质等关系方面的研究有待进一步深入。因此,本文欲采用 Bowman 和 Cole 有机 P 分组方法,在长期定位试验的基础上对此进行深入研究。

1 材料与方法

供试土壤样品采自陕西省长武县十里铺长期定位试验地,无灌溉条件。试验区土壤为粘盖黑垆土,试验开始于 1984 年,试验开始时土壤耕层(0~20cm)基本理化性状如表 1 所示。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic properties of tested soils

土层 (cm)	有机质(g/kg)	全 N (g/kg)	碱解 N (mg/kg)	全 P (P) (g/kg)	速效 P (P) (mg/kg)	速效 K (K) (mg/kg)	PH
0~20	10.5	0.8	37	1.26	3	129	8.1

试验选取冬小麦连作系统 6 个处理,包括 CK、N、P、NP、NPM、F。CK 为不施肥处理,N 为 120Kg/hm²,P 为 26.4Kg/hm²,NP 指 N 120Kg/hm²、P 26.4Kg/hm²,NPM 指 N 120Kg/hm²、P 26.4Kg/hm²、有机肥 75000kg/hm²,F 为休闲处理。试验中 N 肥用尿素,P 肥用过磷酸钙,有机肥用纯牛粪(平均

含有机质 18.1 g/kg,全 N 1.164 g/kg,全 P 2.4 g/kg),肥料在播种前撒施并翻入土中,田间管理同大田。2001 年小麦播种前取样,测定有机质、全 P、速效 P,进行有机 P 分组测定。土壤有机质、全 P、速效 P 按常规分析方法测定,有机 P 分组测定采用 Bowman 和 Cole 法^[6]。

2 结果与讨论

2.1 长期施肥对土壤有机 P 的影响

2.1.1 长期施肥土壤有机 P 的变化 土壤有机 P 来源于动植物残体、微生物的代谢产物,是土壤有机质不可分割的重要组成部分。土壤有机 P 含量变化很大,据 Fares、Walker 等人的研究,土壤有机 P 含量一般与土壤母质、有机质含量、降水等因子有关,此外,土壤排水状况以及耕作措施也影响着土壤中有有机 P 的含量^[2]。

不同处理可不同程度地影响土壤有机质含量,不同处理对土壤有机 P 产生不同的影响。长期休闲土壤有机 P 占全 P 的 17.2%,不施肥土壤有机 P 占

全 P 的 19.4%,小麦连作长期施肥,土壤有机 P 占全 P 的 18.5%~29.6%,其中 N 处理所占比例最大为 29.6%,P 处理所占比例最小为 18.5%。施肥可提高土壤中有有机 P 含量,其中以 NPM 提高幅度最大,与 CK 相比增加 95.23mg/kg,提高了 77.6%,其次为 NP、N、P,分别增加 82.75、60.53、12.23mg/kg,提高了 67.4%、49.3%、10.0%。NPM 与 NP 比,有机 P 增加 12.48 mg/kg,提高了 6.1%。长期休闲土壤有机 P 减少 10.14 mg/kg,降低幅度为 8.3%,这与休闲地有机质含量小于 CK 相对应,可能是由于长期休闲地地表无作物覆盖,地表温度上升导致有机 P 矿化速度加快,有机 P 向无机 P 转化,引起有机 P 含量减少。

表 2 不同施肥处理土壤耕层 P 素含量

Table 2 P content in cultivated layer of soil under different treatment

处理	有机质 (g/kg)	全 P (P)(g/kg)	速效 P (P)(mg/kg)	有机 P (mg/kg)
CK	11.1	0.632	1.68	122.70
N	11.48	0.619	4.36	183.23
P	11.39	0.731	21.27	134.93
NP	12.39	0.744	13.02	205.45
NPM	16.67	0.867	36.96	217.93
F	9.51	0.655	6.58	112.56

有机与无机肥料配合施用可明显增加土壤有机 P 含量。N 肥、P 肥或 NP 肥配合施用可增加土壤有机 P 含量,其中 NP 肥配合施用增加效果明显高于单施 N 肥、P 肥,单施 P 肥增加土壤有机 P 含量效果最不明显。有机肥有利于土壤有机 P 的累积。

2.1.2 不同施肥处理对耕层土壤有机 P 各组分的影响 Bowman RA 和 Cole CV 根据有机 P 对植物的有效性将土壤有机 P 分为活性有机 P、中等活性有机 P、中等稳定性有机 P 和高等稳定性有机 P 共 4 个部分。各组分的生物稳定性不同,因此,不同施肥处理对土壤有机 P 各组分的影响也不同。

肥料施入土壤后,由于微生物对肥料中 P 素的分解、矿化和固定,导致土壤中有有机 P 各组分发生了变化,各组分在土壤有机 P 总量中所占比例也发生了变化。

土壤有机 P 以中等活性有机 P 为主(图 1),中等活性有机 P 占有有机 P 总量的 72.0%~89.0%,平均为 80.2%,其次为中等稳定性有机 P,占有有机 P 总量的 7.4%~13.8%,平均为 9.8%。高等稳定性有机 P 占有有机 P 总量的 5.9%~12.2%,平均为 9.0%,

活性有机 P 占 1.2%~2.9%,平均为 2.0%。与 CK 相比,不同施肥处理活性有机 P 含量均有增加,其中以 NPM 增加最为显著,增加了 56.6%,其次为 P、NP、N,增加幅度分别为 36.2%、14.5%、9.9%。各施肥处理中等活性有机 P 有所提高,其中 NPM 提高了 51.2%,NP、N、P 分别提高 49.1%、42.7%和 12.5%。施肥有利于增加耕层活性、中等活性有机 P 的含量,这与施肥可使土壤易分解有机质数量增加有关。

中等稳定性有机 P 变化较为复杂,NPM 比 CK 中等稳定性有机 P 含量有所增加,增加幅度为 8.5%,而其它施肥处理中等稳定性有机 P 含量有所下降。施用化肥有利于植物较难利用的中等稳定性、高等稳定性有机 P 的矿化,向植物较易利用的活性、中等活性有机 P 的转化,有机无机肥料配合施用由于有机肥料中有有机 P 含量高,中等稳定性有机 P 的积累程度大于其矿化程度,中等稳定性有机 P 含量反而增加。各施肥处理高等稳定性有机 P 含量较 CK 有所降低,NPM、NP、P、N 降低幅度分别为 16.3%、9.8%、24.8%、16.9%。休闲地有机 P 各组分含量减

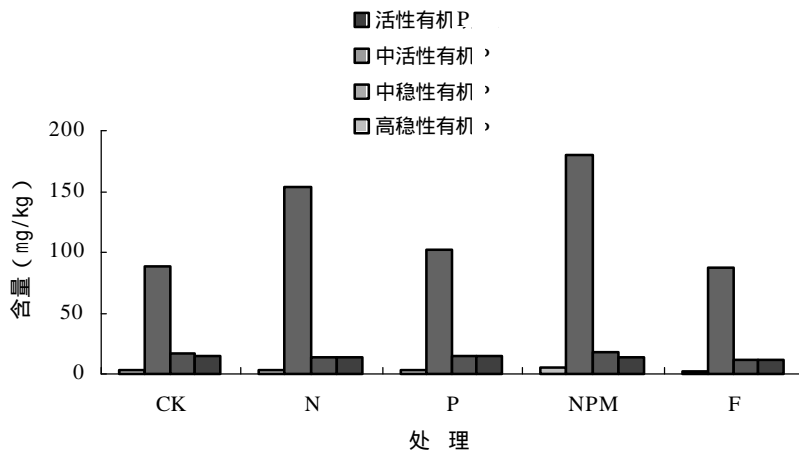


图 1 不同施肥处理耕层土壤有机 P 组分变化

Fig. 1 Variaton of OP fractions content in cultivated layer of soil under different

少，与有机 P 总量减少的原因一致。

长期休闲土壤有机 P 各组分含量均有减少。不同施肥处理有机 P 各组分在有机 P 总量中所占比例不同。施肥可增加活性、中等活性有机 P 含量，减少高等稳定性有机 P 含量，有机无机肥料配合施用可增加中等稳定性有机 P 含量，施用化肥则减少了中等稳定性有机 P 含量。

2.1.3 有机 P 各组分与速效 P、有机质的关系

土壤有机 P 是有机质的组成部分，土壤速效 P 是反映作物 P 素营养的常用指标。用土壤有机 P、有机质、速效 P 及有机 P 各组分作相关分析，可以

判断有机 P、有机 P 各组分对作物的有效性以及提高其有效性的途径。有机 P 总量与有机质呈极显著正相关，与有效 P 呈显著相关(表 3),中等活性有机 P 与有机 P 呈极显著相关，活性有机 P、中等稳定性有机 P 与有机 P 呈显著相关，高等稳定性有机 P 与有机 P 不相关，这从一定程度上说明有机 P 中各组分所占比例情况。活性有机 P 与有效 P 含量呈极显著相关，中等活性有机 P 与有效 P 呈显著相关，中等稳定性有机 P、高等稳定性有机 P 与有效 P 含量不相关，这与 Bowman 和 Cole 法分组原理相一致。

有机 P 可通过矿化作用转化为作物吸收利用的

表 3 不同因子间相关系数 (n=11)

Table 3 Correlation coefficients between different factors

因子	活性 OP	中等活性 OP	中等稳定性 OP	高等稳定性 OP	有机 P
有机 P	0.694*	0.998**	0.678*	0.304	1
有效 P	0.926**	0.610*	0.582	0.106	0.637*
有机质	0.619*	0.610*	0.196	0.222	0.833**

注：OP 代表有机磷。

成分，是作物吸收利用的重要 P 源。施肥尤其是施用有机肥可提高土壤活性有机 P、中等活性有机 P 含量，同时提高了其在有机 P 总量中所占的比例，从而提高了土壤中有有机 P 的有效性。活性有机 P、中等活性有机 P 与有机质含量呈显著正相关，中等稳定性有机 P、高等稳定性有机 P 与有机质含量不相关。因此，能提高土壤有机质含量的施肥、管理措施均能提高土壤中有有机 P 的有效性。

2.2 土壤有机 P 组分的剖面分布规律

P 在土壤中扩散系数极小，一般认为施肥对 P 素剖面分布的影响较小。由于土壤微生物和作物根系分泌物的作用，无机 P 与有机 P、有机 P 各组分之间的相互转化，土壤有机 P 各组分呈现不同的分布规律。本试验选取 CK、P、NPM 3 个处理，对有机 P 各组分的剖面分布及施肥对其影响进行研究。

各处理耕层活性有机 P 含量最高，活性有机 P 在土壤剖面中总体呈下降趋势。施用 P 肥对活性有机 P 的影响主要在耕层，耕层以下各剖面活性有机

P 含量与 CK 接近,剖面分布也与 CK 相同(图 2)。P、CK、活性有机 P 均在 0~80cm 区间呈明显的下降趋势,活性有机 P 为作物易吸收利用的有效 P 源,作物通过根系对 0~80cm 土层内活性有机 P 吸收利用,并以有机物残体形式累积于表层,从而导致活性有机 P 在 0~80cm 区间出现明显的下降趋势,80~120cm 区间活性有机 P 呈不稳定变化,120cm 以下土层活性有机 P 变化不大。NPM 与 CK 活性有机 P 剖面分布有差别,NPM 耕层活性有机 P 含量较高,20~40cm 土层活性有机 P 明显减少,减少值为 4.12mg/kg,减少幅度为 262.4%,40~80cm 区间活

性有机 P 呈较明显的上升趋势,并于 60~80cm 土层出现一峰值,活性有机 P 含量为 2.52mg/kg,80~120cm 区间活性有机 P 含量逐渐降低,在 40~120cm 区间活性有机 P 与 CK 相比累积增加量为 1.27g/m²,120cm 土层深度以下活性有机 P 变化趋势减小。有机无机肥料配施土壤剖面活性有机 P 含量均有增加,耕层增加最为明显,此外,在 60~80cm 土层活性有机 P 出现较明显的增加,可能是由于根系分泌物促进此区间中等稳定性、高等稳定性有机 P 的转化所致。

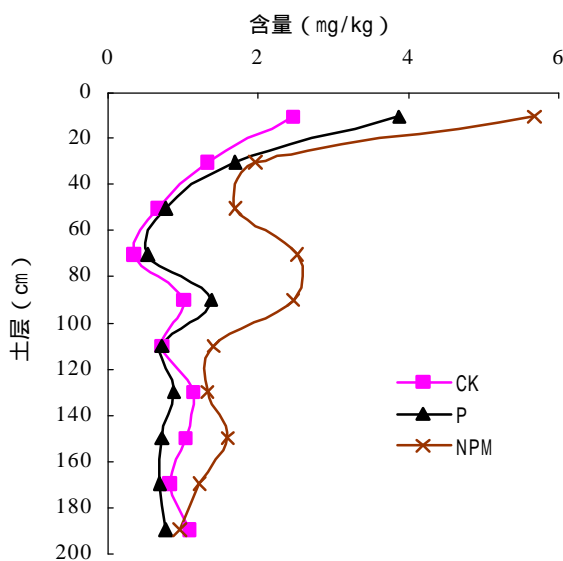


图 2 活性有机 P 剖面分布
Fig. 2 profile distribution of active OP

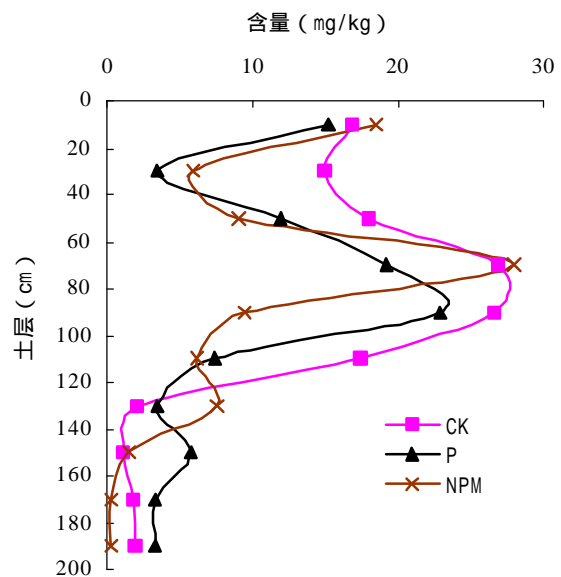


图 3 中稳性有机 P 剖面分布
Fig. 3 profile distribution of moderately stable OP

中等稳定性有机 P 在土壤剖面呈“S”型分布,各处理剖面分布规律基本相同(见图 3)。中等稳定性有机 P 在耕层有一定程度的累积,20~40cm 土层呈明显下降趋势,NPM、P、CK 中等稳定性有机 P 含量减小值分别为 12.63 mg/kg、11.75 mg/kg、1.95 mg/kg,下降幅度分别为 68.5%、77.6%、11.6%,40~100cm 区间呈上升趋势,并在 80~100cm 区间出现一峰值,NPM、P、CK 中等稳定性有机 P 含量分别为 27.96mg/kg、22.89mg/kg、26.84mg/kg,100cm 以下中等稳定性有机 P 含量呈下降趋势,于 140cm 以下土层变化趋势趋于缓和,在 0~140cm 区间中等稳定性有机 P 的累积值 NPM、P、CK 分别为 21.12 g/m²、18.85 g/m²、30.70g/m²,在 0~140cm 区间中等稳定性有机 P 的累积值 P<NPM<CK。耕层中等稳定性有机 P 为 NPM 高于 CK,P

低于 CK,但剖面总体 NPM、P 处理的中等稳定性有机 P 均低于 CK,施肥有利于中等稳定性有机 P 的矿化或向有机 P 其它组分的转化。我们可称中等稳定性有机 P 0~20cm 土层为轻度累积层,20~60cm 土层为亏损层,60~100cm 土层为累积层,100cm 以下土层为轻度亏损层。

中等活性有机 P 不同处理剖面分布规律有差异。NPM 中等活性有机 P 主要累积在耕层(表 4),耕层以下各剖面中等活性有机 P 含量均小于耕层,耕层以下递减至 20~40cm 土层,40~60cm 土层形成一峰值,中等活性有机 P 含量为 154.41mg/kg,小于耕层,100cm 以下规律不明显。P 处理中等活性有机 P 在耕层有一定累积,耕层以下递减至 20~40cm 形成低谷,40cm 以下土层中等活性有机 P 含量均高于耕层,其峰值出现在 60~80cm 土层,中等

表 4 不同施肥处理中等活性有机 P、高等稳定性有机 P 剖面变化 (mg/kg)

Table 4 Profile distribution of moderately active OP and highly stable OP in different treatments

土层 (cm)	中等活性有机 P			高等稳定性有机 P		
	CK	P	NPM	CK	P	NPM
0~20	88.33	100.99	190.87	15.02	14.92	12.92
20~40	125.79	93.52	128.77	13.40	10.84	13.11
40~60	125.3	193.58	154.41	12.64	12.16	11.19
60~80	100.1	208.36	139.26	11.21	13.65	10.20
80~100	100.98	114.60	112.4	12.21	11.25	10.55
100~120	126.38	102.50	130.62	14.32	15.08	10.66
120~140	146.84	113.11	106.57	13.13	12.88	10.51
140~160	153.97	106.87	118.89	10.91	11.02	10.15
160~180	137.68	124.06	132.32	11.03	12.39	12.63
180~200	102.7	118.53	95.95	11.90	10.34	11.50

活性有机 P 含量为 208.36mg/kg, 100cm 以下土层变化不明显。NPM、P 处理在 0~80cm 中等活性有机 P 剖面分布与有机质的剖面分布有关。而 CK 中等活性有机 P 在 20~60cm 明显累积, 此区间含量明显高于耕层, 向下逐渐递减, 100cm 以下规律不明显。有机无机肥料配施对中等活性有机 P 剖面分布的影响深度大于单施 P 肥, 有机无机肥料配施 0~120cm 土层中等活性有机 P 含量增加, P 肥则主要增加 0~100cm 土层中等活性有机 P 含量。

高等稳定性有机 P 随剖面变化不大, 0~60cm 区间 NPM、P 处理高等稳定性有机 P 含量均低于 CK, NPM、P、CK 累积值分别为 9.31 g/m²、9.48 g/m²、10.27 g/m², 与 CK 相比 NPM 减少幅度为 9.3%, P 处理减少幅度为 7.7%, 高等稳定性有机 P 在 60cm 土层以下变化规律不明显, 可见施肥对高等稳定性有机 P 的影响主要在 0~60cm 土层, 施肥促进作物生长和根系发育, 从而促进下层土壤高等稳定性有机 P 的转化。

活性有机 P 在土壤剖面中总体呈下降趋势, 中等稳定性有机 P 在土壤剖面呈“S”型分布, 而中等活性有机 P、高等稳定性有机 P 规律性不明显, 单施 P 肥、有机无机肥料配施对有机 P 组分剖面各层次含量有一定的影响, 但对其分布规律影响不大。

3 结论

(1) 土壤有机 P 占全 P 的 17.2%~29.6%, 有机无机肥料配施可明显增加土壤有机 P 含量, 单施化肥土壤有机 P 总量也有增加。土壤有机 P 以中等活性有机 P 为主, 其次为中等稳定性有机 P、高等稳

定性有机 P、活性有机 P。施用化肥可提高土壤活性有机 P、中等活性有机 P 含量, 减少中等稳定性有机 P、高等稳定性有机 P 含量, 有机无机肥配施可提高土壤活性有机 P、中等活性有机 P、中等稳定性有机 P 含量, 减少高等稳定性有机 P 含量。

(2) 土壤有机 P 与有机质呈极显著相关, 土壤有机 P、活性有机 P 与有效 P 呈极显著相关, 中等活性有机 P 与有效 P 呈显著相关。

(3) 土壤有机 P 各组分土壤剖面分布不同, 活性有机 P 在土壤剖面中总体呈下降趋势, 中等稳定性有机 P 在土壤剖面呈“S”型分布, 而中等活性有机 P、高等稳定性有机 P 规律性不明显, 有机无机肥配施、单施化肥对土壤有机 P 各组分剖面分布影响不大。

参考文献

- 1 沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1997
- 2 Dalal RC. Soil Organic Phosphorus. *Advances in Agronomy*, 1977, 29: 83~117
- 3 Bolland MDA, Weatherley AJ, et al. The long-term residual value of rock phosphate and super phosphate fertilizers for various species under field conditions. *Fertilizer Research*, 1989, 20 (2): 89~100
- 4 Mercik S, Nemeth K. Effects of 60-year N, P, K and Ca fertilization on EUF-nutrient fractions in the soil and yields of rye and potato crops. *Plant and Soil*, 1985, 83(1): 151~159
- 5 郭小冬, 杨玲等. 甘肃省主要耕地土壤磷形态及其有效性研究. *土壤通报*, 1998, 29(3): 119~122
- 6 Bowman RA and Cole CV. An exploratory method for

- fractionation of organic phosphorus from grassland soils. Soil Sci, 1978b, 125: 95 ~ 101
- 7 孙羲, 章永松. 有机肥料和土壤有机磷对水稻的营养效 果. 土壤学报, 1992, 29 (4) : 365 ~ 369
- 8 王旭东, 张一平等. 有机磷在壤土中组成差异的研究. 土壤肥料, 1997, (5): 16~18

VARIATION OF ORGANIC PHOSPHORUS IN SOIL UNDER LONG-TERM FERTILIZATION ON LOESS PLATEAU

Lai Lu^{1,2} Hao Mingde² Peng Lingfa² Zhang Zhenming²

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwestern Science and Technology University of Agriculture and Forestry, Yangling Shaanxi 712100;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi 712100)

Abstract Variation of soil organic phosphorus fractions, and relationship of organic P and its fractions, with soil organic matter and readily available P were studied with Bowman-Cole method. The results showed that active P_o, moderately active P_o, moderately stable P_o and highly stable P_o accounted for 80.2%, 9.8%, 9.0 % and 2.0 % of total P_o, respectively. And combined application of organic manure and inorganic fertilizer significantly increase contents of active P_o, moderately active P_o and moderately stable P_o, but decreased highly stable P_o. Application of chemical fertilizer increased total amount and activity of P_o, and content of moderately active P_o, but decreased contents of highly and moderately stable P_o, and had no significant influence on distribution of P_o fractions. Activity and moderately active P_o showed positive relationship with readily available P, organic matter and total organic P, whereas moderately and highly stable P_o had nothing to do with readily available P and organic matter.

Key words Dryland, Long-term fertilization, Fractions of organic phosphorus

“污染环境风险评价与修复—现状、成就和问题” 战略研讨会即将召开

为进一步推动我国环境科技工作者在污染环境风险评价与修复技术领域的学术交流、合作研究与发展,国家自然科学基金委员会地球科学部和中国科学院资源与环境科学局拟于 2004 年 3 月 24 ~ 26 日在海南省海口市联合主办“污染环境风险评价和修复—现状、成就与问题”战略研讨会,由中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心与国家科技部 973 - 2002CB410800 项目办公室等联合承办。

会议主题包括:污染物的环境监测,污染物生物有效性及其毒理,污染环境风险评价方法、标准和决策支持系统,污染/退化环境修复理论与技术等。会议将以 20 余位特邀专家的评述报告和分组讨论为主,其他研究报告和墙报为辅的方式进行交流。

会议提交摘要和全文的截至日期分别为 2003 年 12 月 30 日和 2004 年 2 月 20 日。有关会议的其他详情请访问中国科学院南京土壤研究所网站 <http://www.issas.ac.cn> 或与会议筹备组直接联系:地址:210008,中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心。

联系人:宋静博士、骆永明研究员。联系电话:025-6881130(宋静);6881101(骆永明)。

传 真:025-6881128。E-mail: jingsong@issas.ac.cn 或 ymluo@issas.ac.cn。