

降水输入旱地农田生态系统中的养分研究^{*}

王旭刚¹, 郝明德², 张春霞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] 对典型旱农地区陕西长武县 2002 和 2003 年降水输入旱地农田生态系统的养分进行了测定。结果表明, 黄土旱塬区 2002 和 2003 年通过降水输入的氮素分别为 6.72 和 10.80 kg/hm²; 氮素输入主要发生在 6~9 月, 占全年输入量的 57.8%; 降水输入的 N 主要是 NH₄⁺-N, 2002 年输入的 NH₄⁺-N 占降水输入总 N 量的 68.5% ± 11.3%, 2003 年占 63.6% ± 9.4%。通过降水输入的 K 在 2002 和 2003 年分别为 0.959 和 2.686 kg/hm²。NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, K 和无机 N 总量与降雨量之间有极显著相关关系, 且各养分之间也有一定的相关性。

[关键词] 旱地农田; 生态系统; 降水补给; 养分变化分析

[中图分类号] S181

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)07-0115-06

大气中的 N, P, K 等活性营养元素通过干、湿沉降可进入土壤。其中大部分营养元素以湿沉降方式进入土壤, 湿沉降的形式有雨、露、雾、雪、霜等。降水向土壤输入的 NO₃⁻-N, NH₄⁺-N 和 K 是补偿农田生态系统 N 素和 K 素损失的重要途径之一^[1]。

不同地区由大气降水带入农田的 N 量各异。在我国 16 个试验点观测到每年由降水带入农田的 N 量为 4~23 kg/hm², 其中主要为 NH₄⁺-N^[2]。沈善敏^[3]测得每年由降水带入农田的 N 为 8.0 kg/hm²; 李生秀等^[4]研究发现, 陕西关中地区每年通过降水输入土壤的 N 量为 14.3~9.7 kg/hm², 其中 NH₄⁺-N 占 71.9%~88.4%; 李世清等^[5]连续 4 年测定发现, 通过降水输入旱地农田生态系统的氮素为 6.3~26.6 kg/hm², 其中 NH₄⁺-N 占 66.3%~88.5%。在我国南方一些地区, 降水中的 N 浓度多在 1~2 mg/L, 每年带入地表的 N 量在 9.0~19.5 kg/hm²^[6]。罗良国等^[7]在研究水稻田生态系统养分平衡及养分效率时发现, 随降水输入农田生态系统中的养分量分别为 N 15.75 kg/hm² (1994 年), 19.05 kg/hm² (1995 年), 16.5 kg/hm² (1996 年); P 0.06 kg/hm² (1994 年), 0.06 kg/hm² (1995 年); K 4.8 kg/hm² (1994 年) 和 4.5 kg/hm² (1995 年)。Yaalon (1964 年) 在以色列, Junge (1958 年) 在美国均发现, 沉降的铵来自土壤 pH 值较高的地区, 而 NO₃⁻与当地土壤的酸碱性关系不大^[8]。苏成国等^[2]

对稻田 N 肥的氨挥发损失与水稻生育期大气 N 湿沉降的相关研究表明, 水稻生育期中总氨挥发量与湿沉降的 NH₄⁺-N 平均浓度和总沉降量呈显著相关关系, 相关系数分别达到 0.988 和 0.996。

有关降水对我国农田土壤 N 素的影响已进行了许多研究^[4~6], 但是对降水输入农田生态系统土壤 P、K 素的研究较少。本研究在分析长武县王东沟试区降水中的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、有效 P 和有效 K 浓度的基础上, 研究了降水输入农田生态系统中的养分量, 以期揭示黄土高原旱塬区降水向农田生态系统输入养分的数量、年际变化和年内分异规律。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

采样地点位于陕西省长武县洪家乡王东村中国科学院长武农业生态试验站, 附近无工厂, 离城市较远, 海拔 1200 m, 无霜期 171 d, 平均年降雨量 578.5 mm (1957~2000 年), 其中最高年份为 822 mm, 最低年份为 327 mm, 7~9 月降水量占全年降水量的 54% 左右。土壤属粘钙黑垆土, 母质是中壤质马兰黄土, pH 8.3 左右。当地主要作物为小麦, 种植面积占粮食作物的 50% 以上, 玉米种植面积仅次于小麦, 苜蓿是当地的主要饲养牧草。当地所用 N 肥主要是碳酸氢铵和尿素, P 肥主要是过磷酸钙, 很

^{*} [收稿日期] 2004-10-22

[基金项目] 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-413); 国家“十五”科技攻关项目 (2001BA508B18)

[作者简介] 王旭刚 (1978-), 男, 河南南阳人, 在读博士, 主要从事土壤肥力与生态环境建设研究。E-mail: nywxg@sohu.com

少施用 K 肥, 在烟草上施用少许硫酸钾。

1.2 样品的采集与分析

降水样品用标准雨量器采集, 每次降水采集 1 次。12 月至翌年 3 月降水形式主要为雪, 当每次降雪完后, 将雪溶化为水, 放在聚乙烯瓶内冷冻贮存。每次降水后, 计量降水并充分混匀, 测定其中主要养分含量。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 用纳氏试剂比色法测定, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 用酚二磺酸比色法测定; 有效 K 用原子吸收法测定。试验测定的数据采用 Microsoft Excel 和 The SAS System For Windows V 8 处理。

2 结果与分析

2.1 研究区降水量动态变化

由图 1 可知, 2002 和 2003 年研究区的降水量变化较大。2002 年全年降水量 387 mm, 仅为多年平均降水量的 66.9%, 属于旱年份; 降水主要集中在 5~7 月, 占全年的 63.8%。2003 年全年降水量 793.6 mm, 为多年平均降水量的 137.2%, 属丰水年份; 年内降水主要集中在 7~9 月, 占全年的 60.6%。

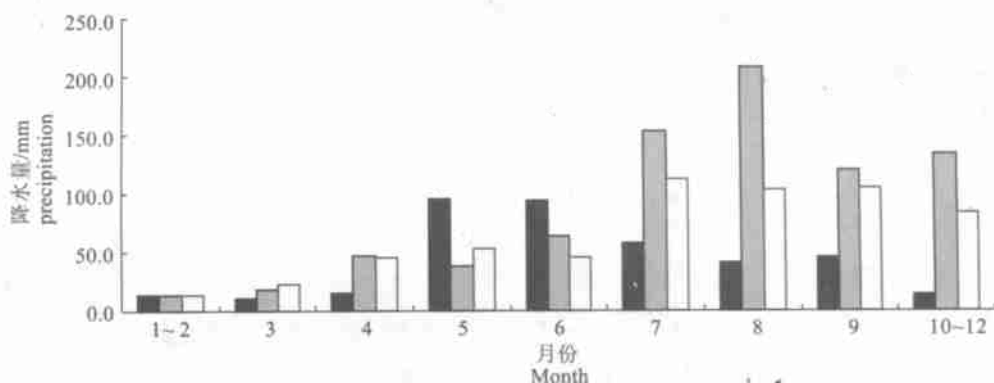


图1 2002和2003年研究区降水量的动态变化
 ■ .Year 2002; ■ .Year 2003; □ .Mean of donkey's years
 Fig. 1 Dynamic variety of rainfall in year 2002 and 2003
 ■ .Year 2002; ■ .Year 2003; □ .Mean of donkey's years

2.2 研究区降水中无机N 浓度的变化

由图 2 和图 3 可知, 降水中无机N 浓度的变化规律性不强。年内降水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度大致呈现持续下降并出现 3 个高浓度密集时段。2002 年降水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的最大值为 3.77 mg/L, 出现在 9 月; 1~6 月降水中除了 1 次 5.5 mm 的降水 (05-01 前后) 外, 其余各次降水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度在 1.59

mg/L 左右, 且变化幅度不大 (标准差为 0.14); 6 月下旬和 8 月 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 又出现较高浓度, 分别为 1.45 和 1.10 mg/L。2003 年 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度最大值出现在 2 月份, 2~3 月份浓度高, 平均为 4.21 mg/L; 4~5 月和 8 月降水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度也较高, 分别为 2.35 和 1.09 mg/L。

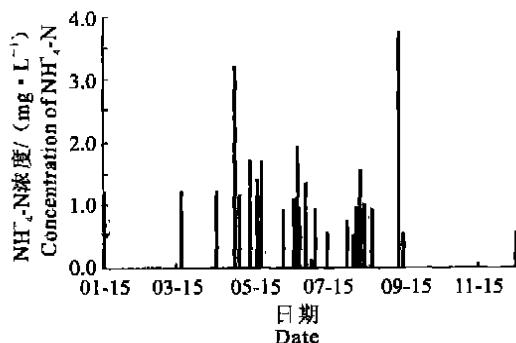


图2 长武县 2002 年降水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化

Fig. 2 Variation of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in precipitation in year 2002

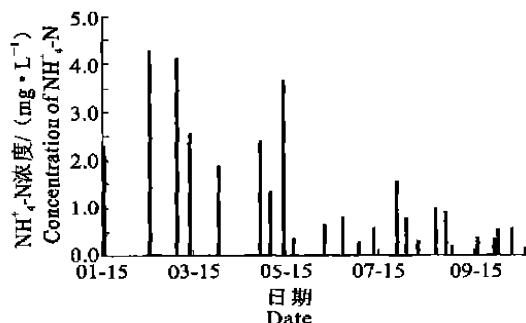


图3 长武县 2003 年降水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变化

Fig. 3 Variation of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in precipitation in year 2003

图4表明, 2002年降水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度最大值出现在9月份, 为 3.09 mg/L ; 5月、6月下旬至7月上旬和8月, 大致出现了3个高浓度密集时段, 浓度分别为 0.78 , 0.79 和 1.01 mg/L 。由图5可知,

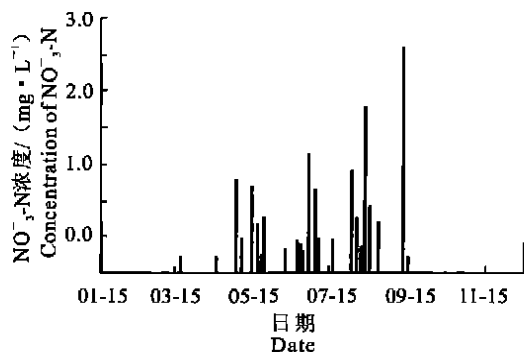


图4 长武县2002年降水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化

Fig 4 Variation of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration in precipitation in year 2002

2.3 通过降水输入农田土壤无机N量的动态变化

通过降水输入农田土壤的无机N量年际变化很大, 年际间的变异与年际间的降水量变化关系密切。研究区2002年降水量为 387 mm , 随降水进入农田生态系统中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 4.371 kg/hm^2 , $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 2.349 kg/hm^2 ; 2003年降水量为 793.6 mm , 随降水进入农田生态系统中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 6.695 kg/hm^2 , $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 4.102 kg/hm^2 。

由图6可知, 由降水输入土壤的无机N量年内变化趋势与降水量的变化趋势大致相同。2002年由

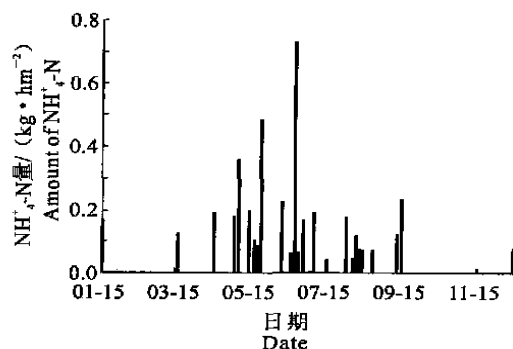


图6 长武县2002年由降水输入农田的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 量变化

Fig 6 Variation of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ amount in precipitation in year 2002

由降水输入农田土壤的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 量则不同。由图8可知, 2002年 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 输入量主要集中在5~7月份, 最大值出现在7月, 为 0.32 kg/hm^2 。5~7月份降水输入的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 总量分别为 0.58 , 0.52 和 0.42 kg/hm^2 , 这3个月的输入量占全年 $\text{NO}_3^- - \text{N}$

2003年降水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度最大值出现在3月份, 为 2.04 mg/L ; 3~6月份 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度持续下降, 6~8月份浓度变化平缓, 并出现弱峰值现象, 9~10月浓度变化不大。

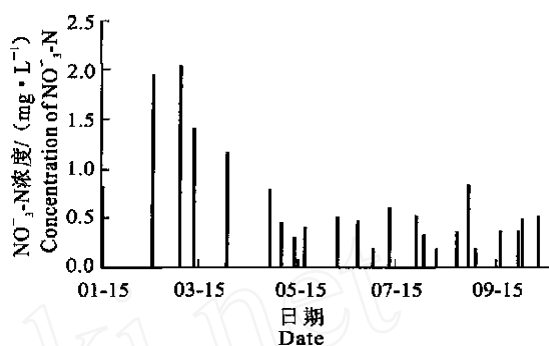


图5 长武县2003年降水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化

Fig 5 Variation of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration in precipitation in year 2003

降水输入土壤的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 最大量出现在6月份, 为 0.73 kg/hm^2 , 全年除了5月份的2次 28 mm 以上降水输入农田的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 量较大(0.36 和 0.48 kg/hm^2)外, 其余各次降水的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 输入量在 0.12 kg/hm^2 左右, 且变化幅度不大。图7表明, 2003年 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的输入主要集中在3~9月, 其中以8月份输入量最大, 为 1.68 kg/hm^2 ; 其次是7月, 为 1.10 kg/hm^2 , 4月为 0.92 kg/hm^2 ; 3月、5月、6月和9月相对较小, 并且相互之间差异不明显。

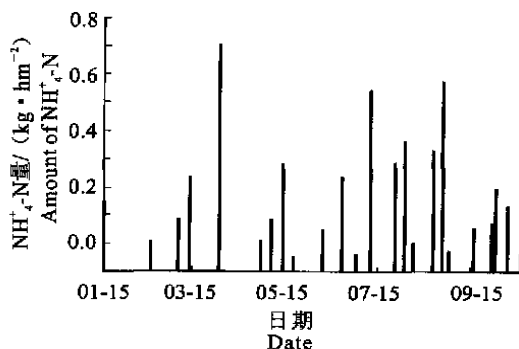


图7 长武县2003年由降水输入农田的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 量变化

Fig 7 Variation of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ amount in precipitation in year 2003

N输入量的62.13%。图9表明, 2003年的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 输入量主要集中在4月、7月和8月, 输入农田土壤的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分别为 0.53 , 0.81 和 1.02 kg/hm^2 , 这3个月的输入量占全年的57.6%。

通过降水输入农田土壤的N主要是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,

2002 年由降水输入的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 占全年降水输入 N 量的 68.5%, 年内变化较大 ($\text{STD} = 11.3\%$); 以 3~4 月份输入 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 量所占比例最大, 占全年 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 输入量的 85.3%。2003 年 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 输入量

占全年降水输入总 N 量的 63.6%, 除了 5 月份 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 输入量较大, 占全年 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 输入量的 80.7% 外, 其余各月份变化较小 ($\text{STD} = 9.4\%$)。

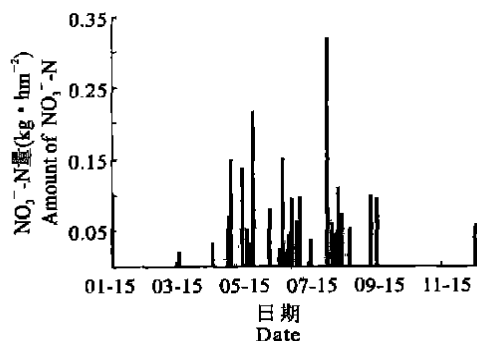


图 8 长武县 2002 年由降水输入土壤的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 量变化

Fig. 8 Variation of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ amount in precipitation in year 2002

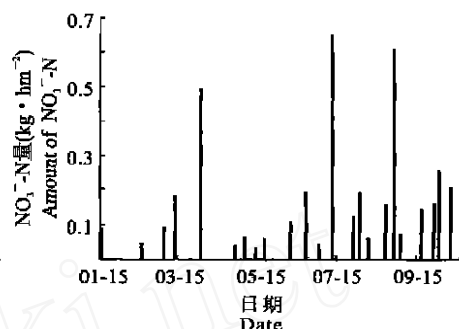


图 9 长武县 2003 年由降水输入土壤的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 量变化

Fig. 9 Variation of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ amount in precipitation in year 2003

2.4 由降水输入农田的 P、K 量及其变化

通常降水中磷浓度很低, 对农业来说意义不大。用中国科学院生态网络 (CERN) 所提供的磷测定方法 (钼蓝比色法) 测不出降水中的磷。

降水中含有的钾量较少, 且年际变化较大。2002 年随降水进入农田生态系统中的 K 总量为 0.959 kg/hm^2 , 2003 年则为 2.686 kg/hm^2 。由图 10 可看出, 2002 和 2003 年降水中钾浓度有着相同的变化趋势, 1~4 月份 K 浓度高, 以 3 月份最高, 2002 和 2003 年分别为 0.72 和 2.43 mg/L ; 5~12 月份变化平缓, 2 年分别约为 0.22 和 0.24 mg/L 。1~4 月份

正是黄土旱塬区沙尘暴频繁季节, 一般呈现出降水量大时, 降水中 K 浓度偏小的现象, 所以降水中的 K 可能主要来自于沙尘中所含的 K。降水输入 K 的总量和降水量有着密切的关系 (图 11), 2002 年 5~7 月份降水量占全年降水总量的 63.8%, 输入农田土壤的 K 量占全年输入总量的 61.8%。2003 年 8~9 月份降水量占全年降水总量的 41%, 输入土壤的 K 量占全年输入 K 总量的 32.4%。但 2003 年 3~4 月份输入的 K 量占全年的 34.3%, 而降水量仅占全年的 8.1%, 说明通过降水输入的 K, 主要来自于大气沙尘中的 K。

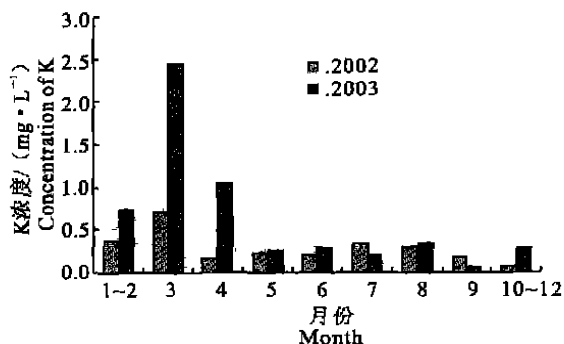


图 10 长武县 2002 和 2003 年降水中 K 浓度变化

Fig. 10 Variation of K concentration in precipitation in year 2002 and 2003

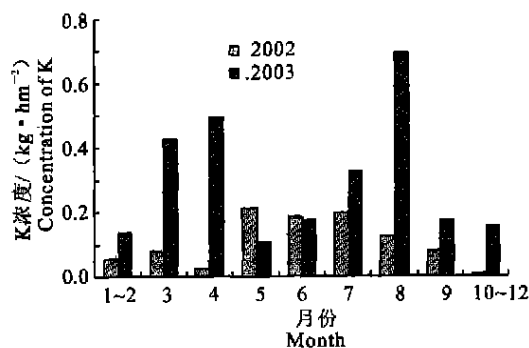


图 11 长武县 2002 和 2003 年由降水输入 K 量的变化

Fig. 11 Variation of K amount in precipitation in year 2002 and 2003

2.5 降水输入养分与降水量的关系

由长武县王东沟试区 2002~2003 年降水输入农田养分量的相关分析 (表 1) 可以看出, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 输入量和无机 N 总量与降水量关系密切,

相关系数分别为 0.67 , 0.79 和 0.77 , 均达到极显著水平, 这一点进一步证实了李世清等^[5]、李玉中等^[8]对降水量与降水输入的无机 N 量之间有联系的推测。通过降水输入土壤的 K 量与降水量也具有密切

关系, 其相关系数为 0.488, 达到极显著水平。各养 分量之间也有一定的相关关系(表 1)。

表 1 长武县降水中养分量的相关系数及显著性检验

Table 1 Pearson correlation coefficients, $n=51$, Prob> $|r|$

指标 Index	降水量 Precipitation	铵硝比 Ratio	NH ₄ ⁺ - N 量 Amount of NH ₄ ⁺ - N	NO ₃ ⁻ - N 量 Amount of NO ₃ ⁻ - N	无机氮量 Mineral nitrogen	钾量 Amount of K
降水量 Precipitation	1.000 00	- 0.150 19	0.670 25	0.786 72	0.765 17	0.487 60
		0.292 8	< 0.000 1	< 0.000 1	< 0.000 1	0.000 3
铵硝比 Ratio		1.000 00	0.218 78	- 0.261 55	0.027 15	- 0.095 94
			0.123 0	0.063 8	0.850 0	0.503 0
铵态氮量 Amount of NH ₄ ⁺ - N			1.000 00	0.758 47	0.959 03	0.677 56
				< 0.000 1	< 0.000 1	< 0.000 1
硝态氮量 Amount of NO ₃ ⁻ - N				1.000 00	0.911 81	0.734 81
					< 0.000 1	< 0.000 1
无机氮量 Mineral nitrogen					1.000 00	0.745 33
						< 0.000 1

降水中NH₄⁺ - N,NO₃⁻ - N 和 K 的浓度相对于降水量来说变化较小。降水输入土壤中的养分量年际变化主要受年际降水量的影响, 降水量高, 输入的 N、K 素就多。每年 2~3 月份的降水形式主要是雪, 雪的吸附作用使大气中的粉尘大部分随降水返回地面, 因此降水中NH₄⁺ - N 和NO₃⁻ - N 的浓度较高, 但这些月份的降水量较少, 这就使得输入土壤的无机N 量较少。7~8 月份是当地群众给晚秋作物(糜谷)追施N 肥时期, 9 月份又是播种小麦的施肥时期, 因而NH₄⁺ - N,NO₃⁻ - N 的浓度在 8~9 月份的降水中也较高, 加之此期降水量大, 故随降水输入土壤的无机N 量也较多。

3 结论与讨论

通过降水输入的N 是黄土旱塬区农田养分的输入方式之一。在 2002 和 2003 年, 通过降水输入的 N 素分别为 6.72 和 10.80 kg/hm², 主要发生在 6~9 月, 占全年输入量的 57.8%。降水输入农田的N 形态主要是 NH₄⁺ - N, 2002 年由降水输入的 NH₄⁺ - N 占全年降水输入 N 量的 68.5%, 以 3~4 月份NH₄⁺ - N 所占比例最大, 占全年NH₄⁺ - N 输入量的 85.3%, 且年内变化较大; 2003 年由降水输入的NH₄⁺ - N 占全年降水输入 N 量的 63.6%, 除 5 月份NH₄⁺ - N 占全年NH₄⁺ - N 输入量的 80.7% 外, 年内变化较小。降水中 K 输入量在 2002 年为 0.959 kg/hm², 2003 年为 2.686 kg/hm²。

降水中各离子浓度变化大, 降雨量、空气中沙尘

含量、农事活动等是影响其变异的主要原因。降雨量较小时, 各种离子浓度增加, 但是沉降的养分量并不一定增加。6 月份正是当地群众给早秋作物追施N 肥时期, 7、8 月是当地群众给晚秋作物(糜谷)追施 N 肥时期, 9 月份又是小麦的施肥时期, 这 4 个月施肥量较大, 温度又较高, 有着较多的NH₃ 挥发源, 进入大气的NH₄⁺ - N 也较多。通过气态损失进入大气中的NH₃ 有 90% 与大气中的酸作用转化成NH₄⁺, 84% 的NH₃ 以NH₄⁺ 形态进入降水中^[8]。同时, 这一时期又是该地区降雨最多的时期, 降雨将大气中的NH₄⁺ - N 直接带入农田生态系统。在施肥量大和降雨量多的季节(6~9 月份), 输入的 N 素也较多。由此可见, 降水中的NH₄⁺ - N 与土壤、肥料的氮挥发及降水有着直接联系。而NO₃⁻ - N 则不同, 降水强度小、历时长^[9,10]或者在降水过程中伴有雷电等时, NO₃⁻ - N 浓度可能会增加。NO₃⁻ - N 主要由 2 条途径产生: 一是由雷击形成, 二是由工业和民用燃料燃烧及汽车尾气等产生。由于该区附近无工厂且离城市较远, 降水中NO₃⁻ - N 可能主要是通过雷电作用形成, 反硝化作用挥发损失的NO_x 也占很重要的一部分, 还有一部分是土壤粉尘随降水进入土壤, 所以在 3~5 月份和 7、8 月份的降水中,NO₃⁻ - N 的浓度高, 有着很大的年际变异和季节变异性。

另外, 从黄土旱塬区养分平衡的角度来看, 随降水进入农田生态系统的N 具有重要的意义。从另一角度来看, 降水中N 浓度高, 说明氮肥、特别是化学氮肥在施用上存在一些问题。

[参考文献]

[1] Haynes R J. Origin, distribution and cycling of nitrogen in terrestrial ecosystems[A]. Haynes R J. Mineral nitrogen in plant-soil systems[C]. San Diego: Academic Press Inc, 1996. 1- 51.

- [2] 苏成国, 尹 斌, 朱兆良, 等. 稻田氮肥的氮挥发损失与稻季大气氮的湿沉降[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1884- 1888
- [3] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 57- 110
- [4] 李生秀, 李世清. 黄土旱塬降水向土壤输入的氮素[J]. 干旱地区农业研究, 1993, 11(增刊): 83- 92
- [5] 李世清, 李生秀. 陕西关中湿沉降输入农田生态系统中的氮素[J]. 农业环境保护, 1999, 18(3): 97- 101
- [6] 徐仁扣. 我国降水中的 NH_4^+ -N 及其在土壤酸化中的作用[J]. 农业环境保护, 1996, 15(3): 139- 142
- [7] 罗良国, 闻大中, 沈善敏. 北方稻田生态系统养分平衡研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3): 301- 304
- [8] 李玉中, 祝廷成, 姜世成. 羊草草地生态系统干湿沉降氮输入量的动态变化[J]. 中国草地, 2000, (2): 24- 27
- [9] 张国森, 陈洪涛, 张 经, 等. 长江口地区大气湿沉降中营养盐的初步研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(7): 1107- 1111
- [10] 黄国宏, 陈冠雄, 韩 冰, 等. 土壤含水量与 N_2O 产生途径研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 53- 56

Study on nutrients added to agro-eco system by wet deposition in arid area

WANG Xu-gang¹, HAO Ming-de², ZHANG Chun-xia²

(1 College of Resources Environment, North West A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Wet deposition (precipitation) samples were collected in Changwu, Shaanxi for 2 years and mineral nutrients in it were analyzed. Results showed that wet deposition brought a large amount of mineral nutrients into agro-ecosystem in the loess plateau. The amounts of N were 6.72 kg/hm² and 10.80 kg/hm² in 2002 and 2003 respectively. It mainly happened from June to September, and brought 57.8% of the total mineral nitrogen. The main form of nitrogen introduced by wet deposition was NH_4^+ -N, which occupied 68.5% ± 11.3% and 63.6% ± 9.4% of the total mineral nitrogen in 2002 and 2003 respectively. The amounts of K it brought into the agro-ecosystem were 0.959 kg/hm² and 2.686 kg/hm² in 2002 and 2003 respectively. The result of statistics showed that there is a correlation among NH_4^+ -N, NO_3^- -N, K, total mineral N and rainfall.

Key words: arid farmland; agro-ecosystem; precipitation recharge; analysis of variety of nutrients