

我国农田土壤的主要温室气体 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放研究*

宋文质 王少彬 苏维瀚

曾江海 王智平 张玉铭

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100083) (中国科学院农业现代化研究所, 石家庄 050021)

摘要 讨论土壤中主要温室体 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的排放过程。计算我国农田生态系统排放 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的总量。1990年, 中国地区 CO₂、CH₄ 和 N₂O 农田排放源强分别是 260TgCO₂, 17.5 TgCH₄ 和 0.096 TgN, 它们占我国相应这些气体排放总量的 8%, 50%和 10%。论述了温室气体浓度增加可能对农业产生的影响及应采取的控制对策。

关键词 温室气体, 农业源, 农田土壤。

大气中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 是重要的温室气体, 它们对全球气候变暖的增温贡献分别是 60%, 15%和 5%^[1]。由于人类活动的影响, 大气中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的浓度已经比工业化革命以前增加了许多, 而且还在以每年 0.5%, 1.1%和 0.3%的速度增加^[1]。政府间气候变化委员会(IPCC)预测, 如果这些温室气体照目前的速度进行下去, 到 2025年, 全球气温将大约升高 1℃, 到下世纪末, 全球气温将比现在高 3℃^[2]。

大气中这些温室气体的增加主要是人类活动的结果, 其中农业生产的贡献占相当重要的比例。据估计, 大气中 20%的 CO₂, 70%的 CH₄ 和 90%的 N₂O 来源于农业活动和土地利用方式的转换等过程^[3]。中国作为农业大国, 研究农业活动对温室气体排放量的贡献对农业生产 and 人类发展都有着重要的现实意义。

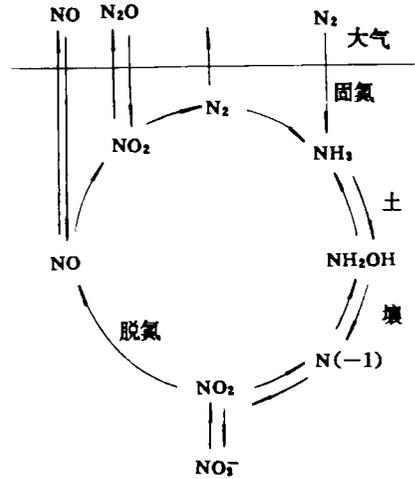


图1 氧化亚氮循环过程

1 农田生态系统释放温室气体的过程及其排放量的大小

1.1 N₂O 的排放

农业生态系统排放的 N₂O 是由土壤中微生物活动产生的。其中之一是反硝化过程, 它是指在通气不良条件下, 由土壤微生物将硝酸盐或硝态氮还原成氮气(N₂)或氧化氮(N₂O、NO)的过程。另一机制是硝化作用, 它是在通气条件下土壤中硝化微生物将铵盐转化为硝酸盐, 其中释放出部分 N₂O。图 1 给出了土壤与大气间 N₂O 交换的循环过程。

土壤释放 N₂O 通量受诸多因素的影响(见表 1)。不同时间和地点测定 N₂O 的通量存在很大的差异, 笔者在华北旱地农田(包括冬小麦、玉米、蔬菜地和苜蓿地)上进行的 N₂O 通量测定结果表明, N₂O 排放通量有明显的日变化和季节变化规律, 施氮肥田释放 N₂O 通量大于未施氮肥田 N₂O 通量值, 在整个观测阶段, 得到 N₂O 平均排放通量为 16 μgN/m²·h^[4]。Khalil 等在我国南方水稻田中测定了 N₂O 的排放情况, 结果发现水稻

* 国家“八五”科技攻关研究课题

收稿日期: 1995-07-02

田释放的 N_2O 量很少, 而且部分吸收 N_2O , 平均排放通量为 $-1.0 \mu gN/(m^2 \cdot h)^{[5]}$ 。水稻田较少释放 N_2O 是因为在厌氧条件下, N_2O 最终变成 N_2 后才排入大气中。

表 1 影响土壤释放 N_2O 的因素

管理方式	环境因素
施肥类型和施肥量	温度
施肥技术和时间	降水
耕作方式	土壤温度
其它化学物质的使用	土壤有机碳含量
作物品种	氧气浓度
浇灌	土壤孔隙度
作物收割后残存在	土壤酸度
土壤中 C、N 含量	土壤微生物数量

根据目前的情况, 可以简单地将中国农田分为旱田和水田 2 类, 由其面积和初步测得的 N_2O 排放通量计算出农田释放 N_2O 的总量(表 2)。由表 2 数据可知, 1990 年中国地区农田排放 N_2O 量为 $0.096 TgN$, 占当年我国 N_2O 总排放量 $0.95 TgN$ 的 10% 左右。

表 2 中国地区农田 N_2O 的排放量

农田类型	面积 ^[6] (m^2)	N_2O 排放通量 ($\mu gN/m^2 \cdot h$)		平均排放量 (TgN/a)
		平均值	范围	
水田	2.5×10^{11}	-1.0	-22—32	-0.002
旱田	7.0×10^{11}	16.0	2—60	0.096
总和	9.5×10^{11}			0.096

1.2 甲烷(CH_4)的排放

土壤中甲烷的产生和消耗是微生物活动的结果。在厌氧条件下, 甲烷菌分解土壤中的有机质, 产生甲烷, 同时, 在好气土壤或土层中, 甲烷又被氧化菌所氧化。图 2 简单地表示了土壤-大气系统间甲烷的交换过程。

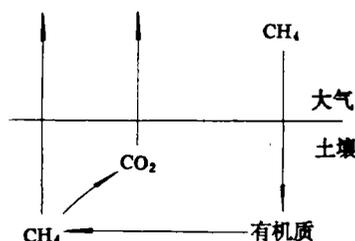


图 2 地-气间甲烷的交换过程

由于甲烷是在厌氧条件下产生的, 所以产生甲烷的土壤环境主要有各种类型的沼泽, 较浅的水体及湿地水稻田。目前认为水稻田是甲烷的主要人为源。水稻田生成

的甲烷是通过 3 个途径释放到大气中的: ① 由于浓度梯度的形成而沿土壤-水, 和水-气界面扩散排出; ② 形成气泡通过水面的逆发而释放; ③ 进入水稻作物根部, 再经作物的通气组织排入大气。实验证明, 由水田土壤产生的大部分甲烷是经由水稻而排放入大气的, 以气体扩散和气泡经水面而排放大气的量较少^[8]。

水稻释放的甲烷同样受土壤的物理化学性质和农业耕作方式的影响。表 3 列出了甲烷排放所受的各种影响因素。Bouwman 评述了影响水稻田甲烷排放量的主要因素的作用^[3]。正是由于影响水稻排放甲烷的因素很多, 才导致了甲烷排放通量存在着时间和空间上的差异。王明星^[9]研究我国杭州水稻田甲烷排放通量时发现, 早稻和晚稻田的甲烷通量日变化趋势不同, 水稻不同生育期时土壤释放甲烷的通量不同, 而且施肥对稻田释放甲烷大小也有影响。陈宗良也研究了不同农业管理方式对水稻田释放甲烷的影响^[10]。比较我国不同地区, 不同品种的水稻田释放甲烷的平均通量可知其排放量很大(表 4)。南方早稻、中稻和晚稻田的甲烷排放通量依次增加, 南方单季稻田的甲烷通量远大于北方单季稻田的甲烷释放通量。对此, Khalil 认为是由于大量使用有机肥和化肥的缘故^[12]。

表 3 影响水稻田排放甲烷的因素

环境因素	农业方式
土壤温度	耕地准备
土壤 pH	育苗和移栽方式
土壤有机质	施肥量和方式
土壤类型	虫害防治
土壤还原电位	淹水量
SO_4^{2-}	水稻品种

表 4 我国各类水稻田甲烷排放通量^[11]

稻田类型	实测地点	甲烷排放通量	
		$mg/(m^2 \cdot h)$	$g/(m^2 \cdot d)$
早稻	杭州	7.8	0.19
中稻	南京	10.83	0.260
中稻 ¹⁾	临安	10.98	0.263
晚稻	杭州	28.6	0.69
北方单季稻	北京	17.64	0.42
北方单季稻	天津	8.81	0.21
南方单季稻 ^[12]	成都	58	1.39

1) 邵志清, 国家气象局气象科学研究所硕士论文, 1991

由于全球水稻田大部分在亚洲, 而中国水稻种植面积又占亚洲水稻面积的 30%, 因此, 中国地区水稻田 CH_4 的排放对中国乃至世界 CH_4 源的贡献都非常重要。笔者将不同品种的稻田甲烷排放通量来计算中国水稻

CH₄ 的排放总量。根据 IPCC 推荐的方法, 稻田甲烷年排放量的计算公式为:

$$\text{甲烷排放量} = \text{水稻收获面积} \times \text{水稻生育期} \\ \times \text{稻田甲烷排放通量}$$

由中国农业年鉴(1991)给出的水稻收获面积, 得出

1990 年我国水稻田排放的 CH₄ 量为 17.5 ± 1.9 Tg(表 5)。王明星, 戴爱国, 黄俊等曾计算出 1988 年中国甲烷的总排放量是 35 ± 10 Tg, 由此可知, 水稻排放的 CH₄ 大约占我国总 CH₄ 的 50%。

1.3 CO₂ 的排放

表 5 中国水稻田 CH₄ 的排放量(1990)

水稻品种	淹水期 (移栽—成熟, d)	面积 (10 ¹⁰ m ²)	CH ₄ 排放通量 [g/(m ² · d)]	CH ₄ 排放总量 (Tg/a)
早稻	80—90	9.4	0.19	1.4—1.6
中稻	100—110	6.2	0.26	1.6—1.8
晚稻	90—100	9.8	0.69	6.1—6.8
北方单季稻	95—110	2.8	0.21—0.42	0.6—1.3
南方单季稻	90—120	4.7	1.39	5.9—7.9
总 和		33.0		15.6—19.4

CO₂ 大部分来源于矿物燃料的燃烧, 由土壤排放的 CO₂ 量只占少部分。大气中 CO₂ 被植物吸收经过光合作用变成有机碳而被利用, 然后有机物通过植物根、茎、叶部的呼吸作用产生 CO₂ 排入大气或在土壤微生物的作用下腐烂分解生成 CO₂ 再排入大气中。图 3 给出了大气-土壤间 CO₂ 的交换过程。

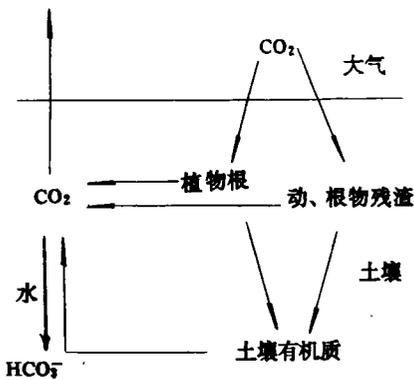


图 3 CO₂ 在大气-土壤的交换过程

目前对由耕地土壤排放 CO₂ 通量的测量工作做的较少。Khaliil 等曾测定过水稻田 CO₂ 的排放通量^[6], 得到其范围在 70—630 mg/(m² · h)。笔者也曾对冬小麦田 CO₂ 的排放进行过研究, 结果表明, 施尿素地 CO₂ 通量大于不施尿素地 CO₂ 排放通量值, 在整个观测时期, 2 种田 CO₂ 平均排放通量分别是 262 mg/(m² · h) 和 177 mg/(m² · h)(表 6)。将我国农田耕地简单分为 2 类——水田和旱田, 并且以水稻和小麦田 CO₂ 排放通量作为 2 类农田的代表来粗略估算耕地排放 CO₂ 的总量。

1990 年 2.5 × 10¹¹ m² 水田和约 7.0 × 10¹¹ m² 旱田平均排放 CO₂ 量分别为 74 Tg 和 183 Tg, 总和为 257 Tg。康德梦曾估算我国 CO₂ 总排放量为 3300 Tg^[12], 农田排放 CO₂ 约占全国 CO₂ 源的 8%。

表 6 农田释放 CO₂ 的排放通量

农 田	排放通量[mg CO ₂ /(m ² · h)]	
	平均值	范 围
水稻	295	70—630
施肥的麦田	262	120—400
未施肥的麦田	177	100—280

2 温室气体浓度增加对农业的影响

大气中温室气体 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的浓度增加后将会引起地表温度的上升, 降水量的增加, 给农业生态系统带来许多直接和间接的影响。不仅如此, N₂O 作为平流层中 NO 和 NO₂ 的源, 它的浓度增加会导致臭氧层损耗^[14]。臭氧层减薄必将使到达地面的 UV-B 辐射增加, 从而影响农作物产量, 危害农业生产的发展。

气候变化后会导致全球许多生态环境变化, 这些变化对农业生产的作用既会产生有利的效果也会带来不利的影响。

2.1 有利的作用

CO₂ 浓度的增加将提高植物光合作用速率, 提高农作物产量, 增进水的利用效率, 还将降低单位面积上的蒸腾速率^[15]。除以上直接作用外, 气温升高, (1) 可以使水稻, 玉米等喜热高产农作物种植地域北移, 从而促进单产和总产共同提高; (2) 改变作物布局 and 结构, 促进各地耕作种植制度改革, 提高复种指数; (3) 降低冬

季低温冻害,提高北方地区农作物产量。

2.2 不利的影响

CO₂ 浓度增加,虽然可以促使作物提高水分利用率,但气温升高,会使作物呼吸加快,消耗增加,导致干物质净积累减少,从而影响作物产量。同时,气候的变化,造成降水状况及作物生长季节的改变,可能严重影响粮食生产的稳定性。再者,气温升高后,使雨涝、干旱和高温等气象灾害发生率增大,也使农业病、虫害频繁和猖獗,有时还会诱发某些新的病、虫害发生。这些都不利于未来农业的发展。

高素华通过气象-产量预测模式对我国今后冬小麦、玉米、水稻等主要粮食作物产量的变化进行的计算表明,CO₂ 浓度加倍后,华北地区冬小麦减产,西北地区冬小麦增产,水稻的主产区将增产,华北、西北、西南和东北地区玉米增产,而华南,长江中下游地区玉米减产^[16]。由此说明,气候变化对农业的影响是多方面的,对比需作更加深入的研究。

3 控制土壤排放温室气体的对策

(1) 抑制甲烷的排放可以通过对水田进行不排放的水浆管理,使土壤不产生强还原状态,甲烷的产生便可以大幅度降低。日本的研究数据表明,通过水浆管理,改善有机物的施用方法,并且停止施用水稻秸还田,可以抑制稻田甲烷的产生。

(2) 施肥会影响甲烷的排放与消耗。Schutz 等对水稻施尿素和硫酸铵时发现 CH₄ 的排放量降低。王明星等对水稻施用硫酸钾肥时也发现 CH₄ 排放量低于不施肥田 HC₄ 排放量^[9]。这可能是因为肥料中的 SO₄²⁻ 能刺激土壤中硫酸盐还原菌的增长,这种菌与 CH₄ 菌对它们共同的被用物乙酸盐进行争夺,抑制了 CH₄ 的产生,SO₄²⁻ 还原菌可能还参与 CH₄ 的再氧化反应,但此

情况尚需进一步研究才能确定,不过施肥深度与 CH₄ 排放确有关系。表层施肥会增加甲烷排放而深度施肥则可以降低甲烷的排放。

(3) 耕地中发生的 N₂O 是施氮肥的土壤因硝化过程而形成的。如果使用硝化抑制剂,可以较好地抑制 N₂O 的发生。使用缓效性肥料也可以抑制 N₂O 的发生,减少 N₂O 的排放,还可以通过调节氮肥施用时间,少量频施氮肥,采用包衣氮肥,叶面喷施氮肥,氮肥和有机肥混合施用以及使用尿素抑制剂等方法。对于水浇地,大量、少次浇水也会导致较少的 N₂O 排放。

参 考 文 献

- 1 Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse, Science, 1990, 248: 1217-1219
- 2 Houghton J J et al. Climate Change: the IPCC Scientific Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1990: 49
- 3 Bouwman A F. Soils and the Greenhouse Effect. Chichester: John Wiley & Sons, 1990: 78
- 4 Wang SB, Su WH, Song WZ et al. Studies of nitrous oxied emissio from farmlands in north China. Adv. Atmos. Sci., 1993, 10(4): 490
- 5 Khalil et al. Emissions of trace gases from chinese rice fields and biogas generation; CH₄, CO, CO₂, chlorocarbons, and hydrocarbons. Chemosphere. 1990, 20: 207
- 6 郑家京主编. 中国统计年鉴(1990). 北京: 中国统计出版社, 1990: 4
- 7 王少彬, 苏维翰. 环境科学, 1993, 14(3): 42
- 8 Renneberg H et al. Ecol. Bull., 1992, 42: 164
- 9 Wang MX et al. Acta Meteor. Sinica, 1990, 4: 265
- 10 陈宗良. 环境科学, 1992, 5(4): 1
- 11 周毅. 农业环境保护, 1993, 12: 49
- 12 Khalil et al. Environ. Sci. Tech., 1991, 25: 979
- 13 康德梦. 中国科协论文汇编. 北京: 1991: 227
- 14 Crutzen PJ. Geophys. Res. LEtt, 1976, 3: 169
- 15 Krupa SV et al. Environ. Pollut., 1989, 61: 263
- 16 高素华, 陈隆勋等. 大气中 CO₂ 上升后的温室效应对我国粮食作物产量的可能影响. 中国环境科学, 1992, 12: 427

(上接第 62 页)

3 结 论

(1) 自制的多孔泡沫塑料载体可在短时间内完成挂膜和流化,挂膜后的载体比重与活性污泥相近,易于流化和固液分离,所需流化动力小,抗冲击负荷能力强;载体生产工艺简单,价格低廉,使用寿命较长,特别适用于对现有活性污泥法污水处理厂的改造和扩建,也适用于中小水量工业废水的生物处理。

(2) 试验装置的正常运行期,各反应器对 COD 的去除率平均在 80%以上,苯酚的去除率为 90%—

100%,出水 COD 和酚可达到排放标准。

(3) 各反应器载体表面生物膜光滑平整,附着牢固,平均厚度为 117.3 μm,膜厚适宜;载体生物膜微生物种类齐全,且主要由丝状菌构成。测定结果表明,载体上的生物膜具有较高的脱氢酶活性,并与酚去除负荷之间存在良好的相关性。

参 考 文 献

- 1 平田 彰, 坂保幸尚. 旭硝子工業技術奨励会研究報告. 1984, 45:133
- 2 Morper M R. Paper Presented at ICEWW'94. 1994, 2:661
- 3 Robert C H. JWPCF, 1973, 45(11): 2303

通过调节各参数,形态分析在一定程度上可以给出重金属的生物毒性信息。环境因素可以改变重金属的形态分布从而影响毒性大小,生物毒性测试在此意义上可以和化学形态分析统一。但目前大多生物试验都是在单一金属和单种生物环境下进行,金属混合物的毒性以及生物群落对毒性效应的影响还有待开展。通过形态与生物毒性关系的研究为在形态的基础上建立新的水质标准提供依据,这正是国际环境界研究的热点。

参 考 文 献

- 1 Cleven R F M J et al. . *Enviroon Technol. Lett.*, 1988, **9** (8): 869
- 2 Morrison G M et al. . *Electroanalysis*, 1990, **2**:9
- 3 Scarano G et al. . *Anal. Chim. Acta*, 1993, **227**:137
- 4 Van Den Berg C M G. *Anal. Proc.*, (London), 1984, **21** (10): 359
- 5 Van Den Berg C M G et al. . *Sci. Total Environ.*, 1986, **58** (1-2): 37
- 6 Van Den Berg C M G et al. . *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 1987, **24**(6): 785
- 7 Miwa T et al. . *Bunseki Kagaku*. 1990, **39**(8): 433
- 8 Agraz R et al. . *Anal. Chim. Acta*, 1993, **283**(1): 650
- 9 Mingelgrim U et al. . *Water, Air, Soil Pollu.*, 1986, **28**(3-4): 351
- 10 Park C K et al. . *Taehun Hwahakhoe Chim.* 1985, **29**(6): 637
- 11 Parthasarathy N et al. . *Anal. Chim. Acta*, 1993, **284**(3): 649
- 12 Monison A et al. . *Analyst* (London), 1990, **115** (11): 1429
- 13 Comber M et al. . *J Autom. Chem.*, 1992, **14**(1): 5
- 14 Zhang M et al. . *Anal. Chim. Acta*, 1987, **197**: 137
- 15 Apte S C et al. . *Anal. Chim. Acta*, 1990, **235**(2): 287
- 16 Gerhardt A. *Introductory Paper*, Lund Uvnersity, 1990: 58, 33
- 17 U. S. Environmental Protection Agency, *Quality Criteria for Water* 1986, EPA 44015-86-001
- 18 Campbell P G C et al. . *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* . 1985, **42**:2034
- 19 Meador J P. *Aquatic Toxicol.* . 1991, **19**: 13
- 20 Gerhardt A. *Water Air and Soil Pollution*, 1993, **66**:289
- 21 Mackie G L. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 1986, **18**: 215
- 22 Pellegrini M et al. . *J. Appl. Phycol.* . 1993, **5**(3): 351
- 23 Bjerselius R et al. . *Aquat. Toxicol.*, 1993, **25**(1-2): 125
- 24 Jayaraj Y M et al. . *Environ. Ecol.*, 1992, **10**(2): 667
- 25 Oikari A et al. . *Sci. Total Environ.*, 1992, 117-118: 367
- 26 Stackhouse R A et al. . *Ecotox. Environ. Saf.*, 1989, **17**: 105
- 27 Van der Berg C M G et al. . *J. Fish. Res. Bd. Can.*, 1979, **36**: 901
- 28 Guy R D et al. . *Wat. Res.*, 1980, **14**: 891
- 29 Tubbing D M J et al. . *Envir. Toxicol. Wat. Qual.*, 1993, **8**: 191
- 30 Spechar R L et al. . *Envir. Toxic. Chem.*, 1986, **5**: 917
- 31 Van Leeuwen C J et al. . *Water quality criteria for heavy metals; a daphnids view*, 1987, **20**: 200
- 32 Rachlin J W et al. . *Arch. Environ. Contami. Toxicol.*, 1993, **24**(1): 16
- 33 Parrot J L et al. . *Can. J. Fish Aquat. Sci.* . 1993. 50(10): 2245
- 34 Kraak M H S et al. . *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 1992, **23**(3): 363
- 35 Borgmann U et al. . *Hydrobiologia*, 1993, **259**(2): 79
- 36 Bariaud A et al. . *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 1984, **32**: 587
- 37 Kraak M H S et al. . *Setac-Europe Founding Conference*. April 1991. Sheffield
- 38 Clements W H et al. . *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* . 1988, **45**: 2017
- 39 Prothro M G. *Memorandum: Office of Water Policy and Technical Guidance on Interpretation and Implementation of Aquatic Life Metals Criteria*, 1993, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C.

(上接第96页)

Agricultural Activities and Emissions of Greenhouse Gases in China Region. Song Wenzhi et al. (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085), Zeng Jianghai et al. (Institute of Agricultural Modernization, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021); *Chin. J. Environ. Sci.*, **17**(1), 1996, pp. 85-88

The emissions processes of greenhouse gases such as CO₂, CH₄ and N₂O from agricultural soils have been studied in this paper. The source strengths of the gases emission from agricultural activities are calculated as 260 Tg of CO₂, 17.5 Tg of CH₄, and 0.096 Tg of N, which account for about 8%, 50%, and 10% of their total emissions in China. An effect of increasing the concentration of these greenhouse gases in atmosphere on agricultural production are also discussed. Some of control strategies on the gases emission from soils, are suggested.

Key words: greenhouse gases, agricultural source emission, impacts.

Research Progress in Heavy Metal Speciation and Toxicity and Bioavailability of Heavy Metals. Qing Liu et al. (State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Beijing 100085); *Chin. J. Environ. Sci.*, **17**(1), 1996, pp. 89-92

Knowledge of the relationship between metal speciation and biological effects is essential to understand heavy metal impacts on the environment. In this paper progress in this research field and different approaches to meet this requirement in recent years were reviewed. The effects of environmental factors with relation to speciation and toxicity/bioavailability of heavy metals were also discussed. The current efforts are directed towards the development of chemical speciation schemes which can be related directly to measures of toxicity/bioavailability. Water quality criteria could be improved based on those information. **Key words:** review, heavy metals, speciation analysis, toxicity and bioavailability, water quality criteria.