

湿地林土壤的 Fe^{2+} , Eh 及 pH 值的变化

唐罗忠^{1,2}, 生原喜久雄¹, 户田浩人¹, 黄宝龙²

(1. 东京农工大学农学部, 日本东京 183-8509; 2 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

摘要:通过在不同含水量(田间持水量的 60%:对照处理;田间持水量的 250%:淹水处理)和不同温度(20℃, 25℃, 30℃)条件下的室内培养,对江苏省里下河地区池杉湿地林土壤的二价铁离子(Fe^{2+})浓度,氧化还原电位(Eh)及 pH 值进行了研究。结果表明,与对照处理相比,淹水土壤的 pH 值和 Fe^{2+} 浓度明显提高($P < 0.01$),而 Eh 值则明显降低($P < 0.01$)。在淹水条件下,高温处理的土壤 pH 值和 Fe^{2+} 浓度明显高于低温处理土壤($P < 0.01$), Eh 值则相反。研究表明,土壤 Eh 值与 pH 值之间存在着密切的 3 次方程式关系($P < 0.001$)。就里下河地区湿地林土壤而言, Eh 值下降至 200mV 以下时,才会有大量的铁元素被还原为 Fe^{2+} 。

关键词:湿地林土壤; 二价铁离子; 氧化还原电位; pH 值

Dynamics of ferrous iron, redox potential and pH of forested wetland soils

TANG Luo-Zhong^{1,2}, HAIBARA Kikuo¹, TODA Hiroto¹, HUANG Bao-Long² (1. Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 183-8509, Japan; 2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 103~107.

Abstract: Iron transformations impact the physical and chemical properties of forested wetland soils and influence the development and stabilization of soil structure. Although it is well known that paddy soils are subject to a succession of iron transformations from ferric to ferrous states under reducing conditions, the dynamics of iron in submerged forest soils have been less studied in China. Transformations of iron, changes in soil redox potential (Eh), and soil pH variations associated with submergence are interrelated, but have not been adequately elucidated in the forested wetland soil in China. To increase the productivity of forested wetlands, it is, however, imperative to understand these relationships. We, therefore, studied the dynamics of Fe^{2+} , Eh and pH under different moisture and temperature regimes using the incubation method. Soil samples (Eutric gleyed paddy soils-China system of soil classification) were collected from a 20 year-old pondcypress (*Taxodium ascendens Brongn.*) plantation, at the Mapen forest research site in Gaoyou city, Jiangsu province, where it is naturally flooded approximately for about two months (from July to September). The soil pH was 6.18 and the total carbon, total nitrogen, and total iron concentrations of soil were 27.6, 2.7 and 21.5 g/kg respectively.

Fresh soil sample (20g) sifted through a 2 mm sieve, and adjusted to approximately 60% (control) or 250% (flooding) water holding capacity was put in a glass jar (140 ml) covered by a cap (having a 2 mm hole to ensure aeration). The jars were incubated at 20, 25, and 30℃, and the soil moisture was adjusted once every week. Changes in pH, Fe^{2+} concentrations and Eh were monitored at regular intervals (up to 80 days after incubation). Compared to control, pH and Fe^{2+} concentrations increased and Eh decreased rapidly in the flooding treatment ($P < 0.01$). When flooded, soil pH and Fe^{2+} concentrations were higher ($P < 0.01$) and Eh was lower ($P < 0.01$) in the 30℃ treatment than other temperature regimes. However, differences in Fe^{2+} concentrations and Eh under the control were not significant among the temperature treatments. The Fe^{2+} concentrations increased significantly when the Eh was lower than 200 mV. The prediction equation: $y = -293.2x^3 + 5302.1x^2 - 32039x + 65167$ (x : pH; y : Eh (mV), $R^2 = 0.969$, $P < 0.001$), used to evaluate the interrelationships between

基金项目:中日国际合作资助项目(10045061)

收稿日期:2003-10-19; **修订日期:**2004-04-20

作者简介:唐罗忠(1967~)男,江苏金坛人,博士,主要从事生物地球化学循环和森林生态学研究。E-mail: tanglz1967@yahoo.com.cn

Foundation item: International Cooperation Program of China and Japan (No. 10045061)

Received date: 2003-10-19; **Accepted date:** 2004-04-20

Biography: TANG Luo-Zhong, Ph. D., mainly engaged in biogeochemistry and forest ecology. E-mail: tanglz1967@yahoo.com.cn

pH and Eh gave a reasonably good fit.

Key words: forested wetland soil; ferrous iron; redox potential; pH

文章编号:1000-0933(2005)01-0103-05 中图分类号:Q142,S718.5 文献标识码:A

大量的研究表明^[1~6],水稻田土壤在淹水状态下,由于氧的供给被切断,土壤中原有的氧因微生物呼吸而很快被消耗殆尽,至使土壤从氧化状态转变为还原状态,土壤的氧化还原电位(Eh)值下降,土壤中高价位的 $\text{NO}_3\text{-N}$, Mn^{4+} , Fe^{3+} , S^{6+} 等离子作为电子受体而被还原为低价位的 $\text{N}_2\text{O-N}$, N_2 , Mn^{2+} , Fe^{2+} , S^{2-} 等物质。与 Fe^{3+} 相比 Fe^{2+} 的可溶性明显提高,更容易被植物所吸收^[2,7]。虽然铁是植物的必须营养元素^[8,9],但是,植物过量地吸收铁,也会导致其生长不良^[10,11]。据研究,水稻如果长期生长在水溶性 Fe^{2+} 浓度达 50 mg/kg 以上的水田土壤中,其叶片会出现褐色,影响光合作用,从而导致植物生长不良,产量降低^[3]。除了水稻以外,烟草如果生长在透水性较差的田地上,也会因过量吸收铁和锰元素而出现症状^[12]。与水稻和烟草等作物相比,林木在此方面的研究比较少。虽然世界上存在着大面积的湿地林^[13,14],人们只是更多地从宏观角度来研究湿地林生态群落的演化以及它们的生物生产力,或是对苗木在人工淹水条件下的光合,呼吸等生理变化加以研究^[13~17],而对其主要的生长环境——土壤,在淹水状态下的氧化还原变化以及其与林木生长的关系还不甚了解。实际上,生长在湿地条件下的树木如火炬松 (*Pinus taeda* L.)^[18]和池杉 (*Taxodium ascendens* Brongn.)^[19]树体的铁浓度特别是根部的铁浓度会明显高于非湿地条件下的树木。

本文在以上基础上,借鉴水稻土研究的理论和方法,对湿地林土壤在不同的水分条件及不同的温度条件下的 Eh , pH 以及 Fe^{2+} 浓度进行了室内试验研究,旨在了解湿地林土壤的氧化还原规律,为湿地林的保护和发展提供一定的理论依据。

1 材料与方法

(1) 供试土壤 供试土壤采集于江苏省里下河地区高邮市(北纬 $32^\circ 20'$, 东经 $119^\circ 40'$)20 年生池杉湿地林。里下河地区的年均气温为 14.5°C , 年降水量为 1100 mm 左右。根据雷文进的研究^[20],由于里下河地区原来是黄河,淮河,长江流出的泥沙经海水的运积而形成的古泻湖,海拔高度只有 2~8 m,自然状态下,呈长期淹水的湖泊或季节性淹水的湿地,自然植被主要为芦苇。本试验的土壤采集地原为季节性淹水区,20 世纪 80 年代初,经人工开挖河渠,一定程度上降低了地下水位后,营造了耐水性较强的池杉湿地林。经调查,该湿地林在每年的 7~9 月份期间大约 2 个月被淹水,淹水深度最大时达 25 cm,淹水期间的土壤温度(5 cm 深处)变动在 $20\sim 30^\circ\text{C}$ 。2002 年 6 月,采集了池杉湿地林的表层土壤(0~5 cm)作为实验用土样。根据中国土壤分类法,该土壤类型为水稻土青泥田(Eutric gleyed paddy soils)^[3]。土样的主要性质是:pH(H_2O)6.18,全碳 27.6 g/kg,全氮 2.7 g/kg,全磷 513 mg/kg,全钾 6.9 g/kg,全钠 239 mg/kg,全钙 4.5 g/kg,全镁 4.1 g/kg,全铁 21.5 g/kg,全锰 160 mg/kg, Fe^{2+} 2.8 mg/kg,硝态氮 65.8 mg/kg,氨态氮 42.7 mg/kg。

(2) 试验方法 将新鲜土样适当粉碎,过 2 mm 筛,称取相当于烘干土重 20 g 的鲜土置 140 ml 容积的玻璃培养瓶中(瓶的内径为 4 cm,高为 9 cm,土样高度约 3 cm),添加蒸馏水至田间持水量的 250%作为淹水处理,淹水高度约 3 cm;同时,根据土壤在田间持水量的 60%左右时,碳,氮无机化反应比较剧烈,陆地植物生长较适宜这一依据^[21~27],在试验土壤中添加蒸馏水至田间持水量的 60%作为对照处理。盖上具透气孔(直径 2 mm)的盖子,分别在 20、25、 30°C 的恒温箱中培养。各处理(水分,温度处理)实验均重复 3 次。培养期间每隔一星期通过称重法用蒸馏水调节其含水量至规定标准。培养开始后的第 1,4,12,20,40,60,80 天,对 2 种含水量处理和 3 种温度处理的土壤分别取 3 个重复样品测定 pH 值和 Fe^{2+} 浓度,并在培养后的第 1,4,8,12,15,20,26,32,40,50,60,80 天时取 3 个重复样品测定土壤的 Eh 值。在论文的各个图中均表示了 3 次重复实验的平均值和标准误差。

(3) 测定方法 不同处理土壤的 pH 值是在土:水=1:2.5 的条件下,用玻璃电极(TOA, HM-7E)法测定。不同处理土壤的 Eh 值是在白金电极(ORION, model 920A)插入到土层中部 1 h 后, Eh 值稳定时读取。 Fe^{2+} 浓度的测定是在参考 Kumada^[28]的方法后进行的,具体的方法为:250%含水量处理的土壤须先将多余的水分过滤以后,加入 100 ml,1 当量浓度的醋酸钠(CH_3COONa , pH=2.8),60%含水量的土壤则直接加入 100ml 的醋酸钠,然后在室温下振荡 2h,过滤,取 2 ml 滤液,加 2 ml 0.1%浓度的 α,α' -dipyridyl 试液,用蒸馏水定容至 25 ml,在 522 nm 波长下比色分析。250%含水量处理的过滤水与上述醋酸钠溶液以 1:1 体积比混合振荡 30min,用相同的方法测定过滤水中的 Fe^{2+} 浓度。由于过滤水中的 Fe^{2+} 浓度均较低(0.5 mg/kg 以下),故在计算土壤中的最终 Fe^{2+} 浓度时,未将其计入。测定时采用的标样是分析纯硫酸亚铁。

2 结果

2.1 不同温度及不同水分条件下土壤 pH 值的变化

从图 1 可以看出,淹水土壤的 pH 值显著高于非淹水土壤($P<0.01$)。淹水土壤在淹水后 20d 以内, pH 值上升比较快,20d 以后呈缓慢的上升趋势。与此相反,非淹水土壤的 pH 值在 80d 的培养过程中基本上是呈缓慢下降的趋势。从图 1 还可以看出,

培养 80d 时,不同的温度处理之间,土壤 pH 值也存在明显的差异($P < 0.01$),其表现为:淹水条件下,pH 值 30℃ 处理的 $> 25^\circ\text{C} > 20^\circ\text{C}$,而非淹水土壤则相反,即,pH 值 30℃ 处理的 $< 25^\circ\text{C} < 20^\circ\text{C}$ 。

2.2 不同温度及不同水分条件下土壤 Eh 值的变化

图 2 表明,与非淹水土壤相比,淹水土壤的 Eh 值明显降低($P < 0.01$),且随着培养温度的提高 Eh 值降低的幅度增大。非淹水土壤的 Eh 值无论在何种温度条件下,自始至终总是在 470 mV 左右轻微变动。

2.3 不同温度及不同水分条件下土壤 Fe^{2+} 浓度的变化

从图 3 不难看出,在淹水条件下,土壤 Fe^{2+} 浓度变化受温度的影响十分明显,在 30℃ 条件下培养 10d 以后,土壤中的 Fe^{2+} 浓度开始明显提高,至 40d 左右时,基本上达到了稳定状态;在 25℃ 条件下,大约需要 20d 以上的培养,土壤中的 Fe^{2+} 浓度才会显著提高;在 20℃ 条件下,至少需要 60d 的培养,土壤中的 Fe^{2+} 浓度才有明显的上升。与淹水土壤相比,非淹水土壤的 Fe^{2+} 浓度始终处于较低的状态,且不因培养温度的变化而变化。

3 讨论

土壤 Eh 值的大小与土壤中各种氧化还原物质的转化程度密切相关,从图 4 可以看出, Eh 值高于 200 mV 时,土壤中几乎不出现 Fe^{2+} ,即 Fe^{3+} 不会被还原为 Fe^{2+} ,而当 Eh 值低于 200 mV 时,土壤中的 Fe^{2+} 浓度明显提高,且随着 Eh 值的不断下降 Fe^{2+} 浓度不断提高。这一结果与 Yamane 等人的研究结论^[7]一致。然而,潘淑贞的研究^[29]表明, Eh 值在高于 200 mV 时仍然会有较高浓度的 Fe^{2+} 存在。这一现象表明,土壤种类不同,即土壤的性质不同,可能会存在一定的差异;另外也可能与 Eh 测定的准确性有关,由于土壤是非均一体,在用白金电极测定 Eh 值时往往难以测得土壤的整体 Eh 值,特别是在大田条件下。

土壤在淹水条件下 pH 值升高这一现象与土壤处于缺氧状态下而发生一系列还原反应有关。根据对该土壤中的无机态氮浓度的动态测定知,在淹水条件下,经 10d 左右的培养,土壤中的硝态氮就会全部消失(高温条件下相对较快,数据未发表),而氨态氮浓度有少量提高,这一结果与土壤在淹水条件下因缺氧而导致硝态氮被还原,即出现脱氮现象有关。相反,未淹水土壤的硝态氮浓度随着培养温度的提高和培养时间的延长而逐渐增

高。硝态氮中的硝酸根是一种强酸离子,如果土壤中存在大量的硝态氮,其 pH 值就可能较低,相反,如果硝态氮明显减少或消失,pH 值往往就会上升,这一结果已被一些研究^[2,12,30,31]所证明。当然,在淹水条件下,土壤硝态氮消失以后,pH 值仍然呈上升趋势,这一结果应该与其他物质被还原有关,如有机还原物质的形成和 Mn^{2+} , Fe^{2+} (图 3) 甚至 S^{2-} 等无机还原物质的出现^[7,29]。

温度对土壤 pH 值的影响主要是取决于不同温度条件下微生物的活性。在温度较高的淹水状态下,微生物活性高,耗氧快,还原反应强烈,还原性物质产生的快且多,与氧化态物质相比,相应的还原态物质的碱性较强^[2],因而 pH 值较高。在非淹水条件下,土壤处于氧化状态,培养温度较高的土壤因微生物活性高,有机物分解快,氮的硝化作用强而产生较多的酸性较强的硝态氮,最终导致 pH 值的下降幅度比低温状态时大。

在淹水条件下,土壤 pH 值的提高并不是无限制的。根据于天任等人的研究^[3]认为,酸性土壤在淹水还原状态下,pH 值会逐渐提高,并达到中性左右;相反,碱性土壤在淹水还原条件下,pH 值会降至中性左右。碱性土壤在还原状态下 pH 值的下降被认为与二氧化碳的增加有关^[3]。

从土壤 pH 值和 Fe^{2+} 浓度的关系(图 5)可以看出,本试验土壤在淹水状态下,pH 值升至 7 时, Fe^{2+} 开始大量出现。当然这一结果并不能说明所有种类的土壤只有当 pH 值达到中性 7 的时候, Fe^{3+} 才会被大量还原为 Fe^{2+} 。根据 Asami 等人的研究^[32~36]可知,pH 值即使在 7 以下甚至 6 以下时,还原性土壤中仍然可以有大量的 Fe^{2+} 出现。由此表明,不同种类的土壤在还原过程中

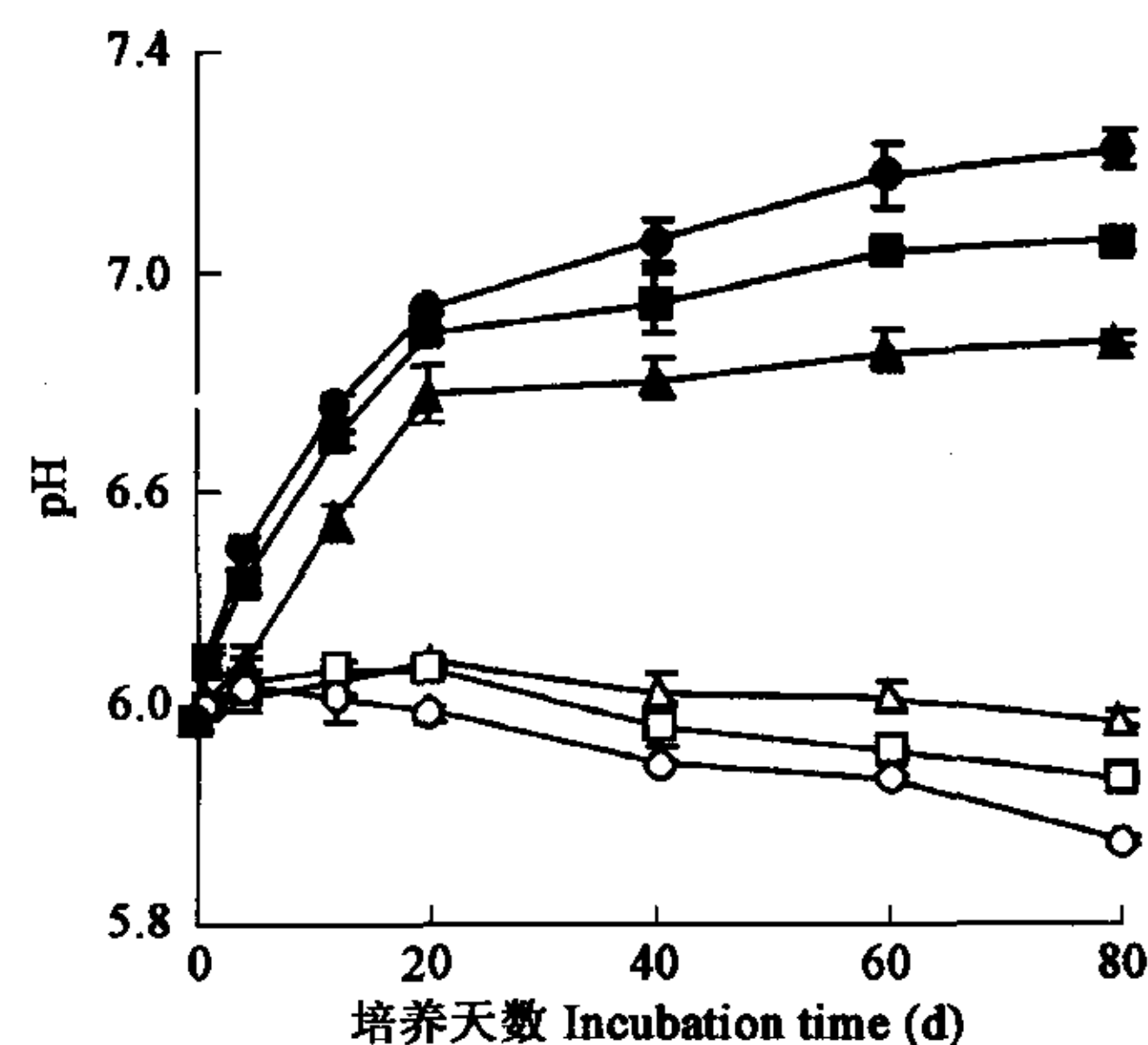


图 1 不同温度及不同水分条件下培养土的 pH 值变化

Fig. 1 Dynamics of soil pH under the different temperature and moisture conditions

持水量 Water holding capacity (%): $\triangle$ 20℃, 60; $\blacktriangle$ 20℃, 250; $\square$ 25℃, 60; $\blacksquare$ 25℃, 250; $\circ$ 30℃, 60; $\bullet$ 30℃, 250; 图中显示了各数值的标准误差 Error bars indicate standard error; 下同 the same below

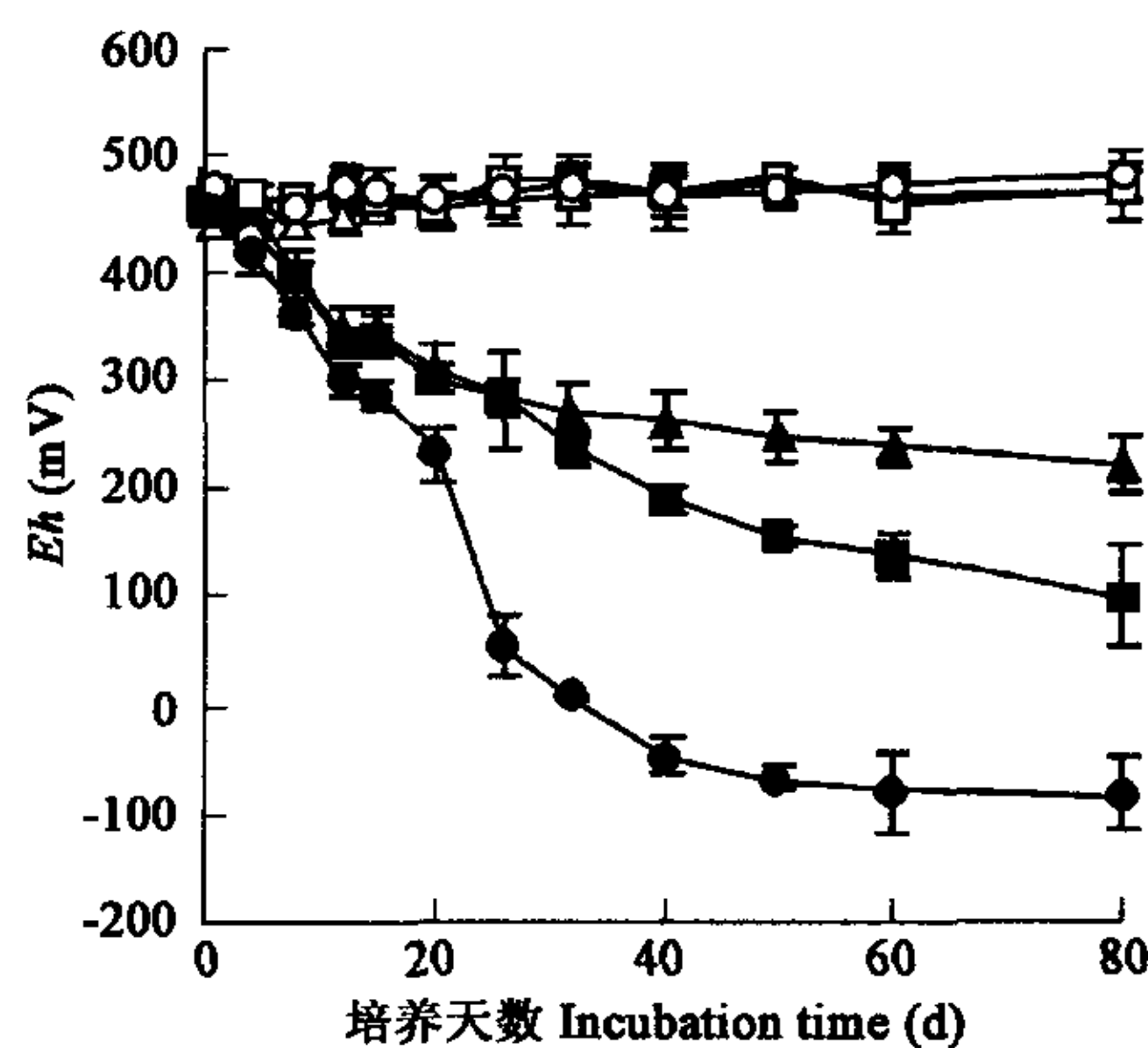


图 2 不同温度及不同水分条件下培养土的 Eh 值变化

Fig. 2 Dynamics of soil Eh under the different temperature and moisture conditions

大量形成 Fe^{2+} 时的 pH 值是不相同的。

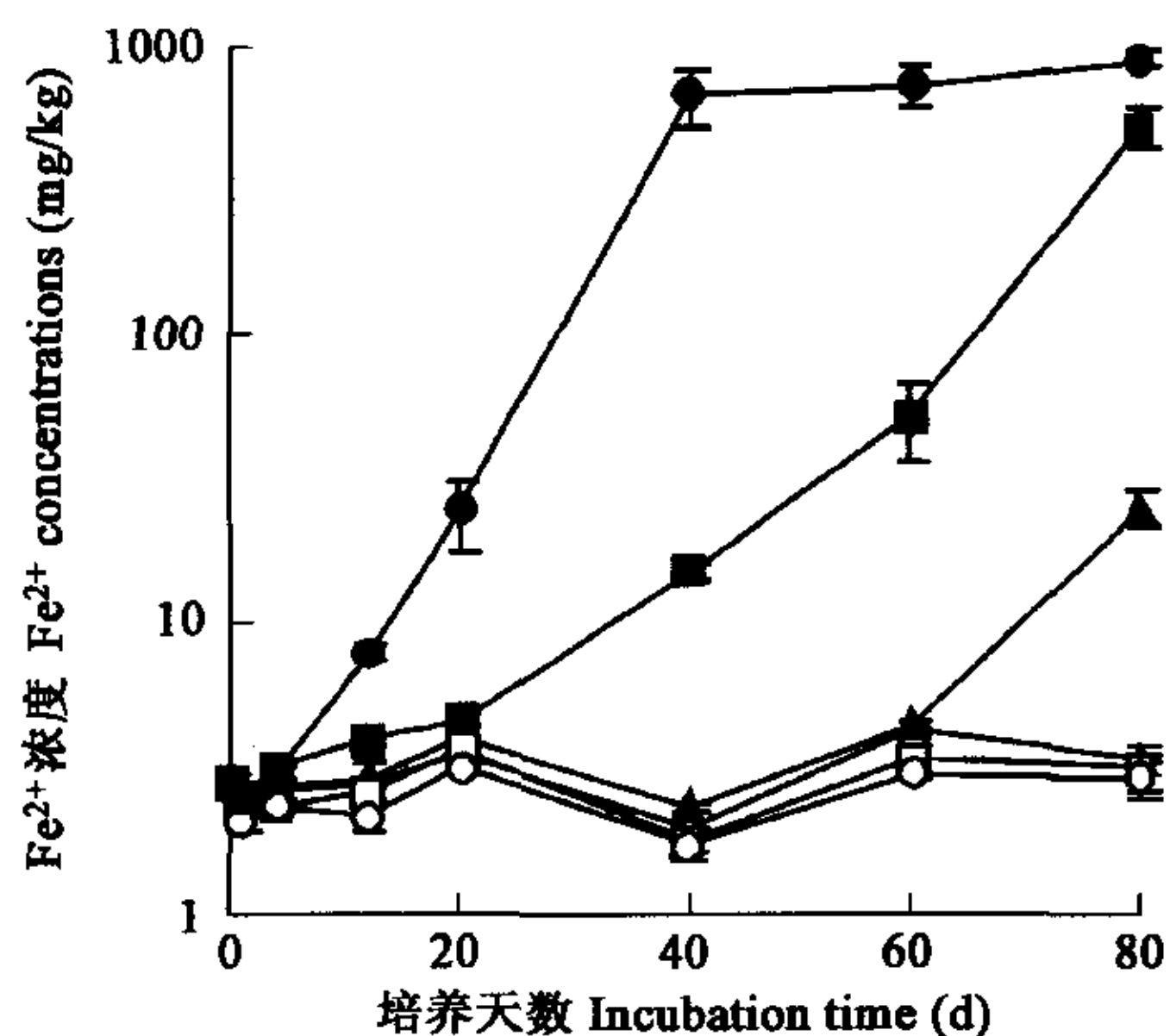


图 3 不同温度及不同水分条件下培养土的 Fe^{2+} 浓度变化

Fig. 3 Dynamics of soil Fe^{2+} concentrations under the different temperature and moisture conditions

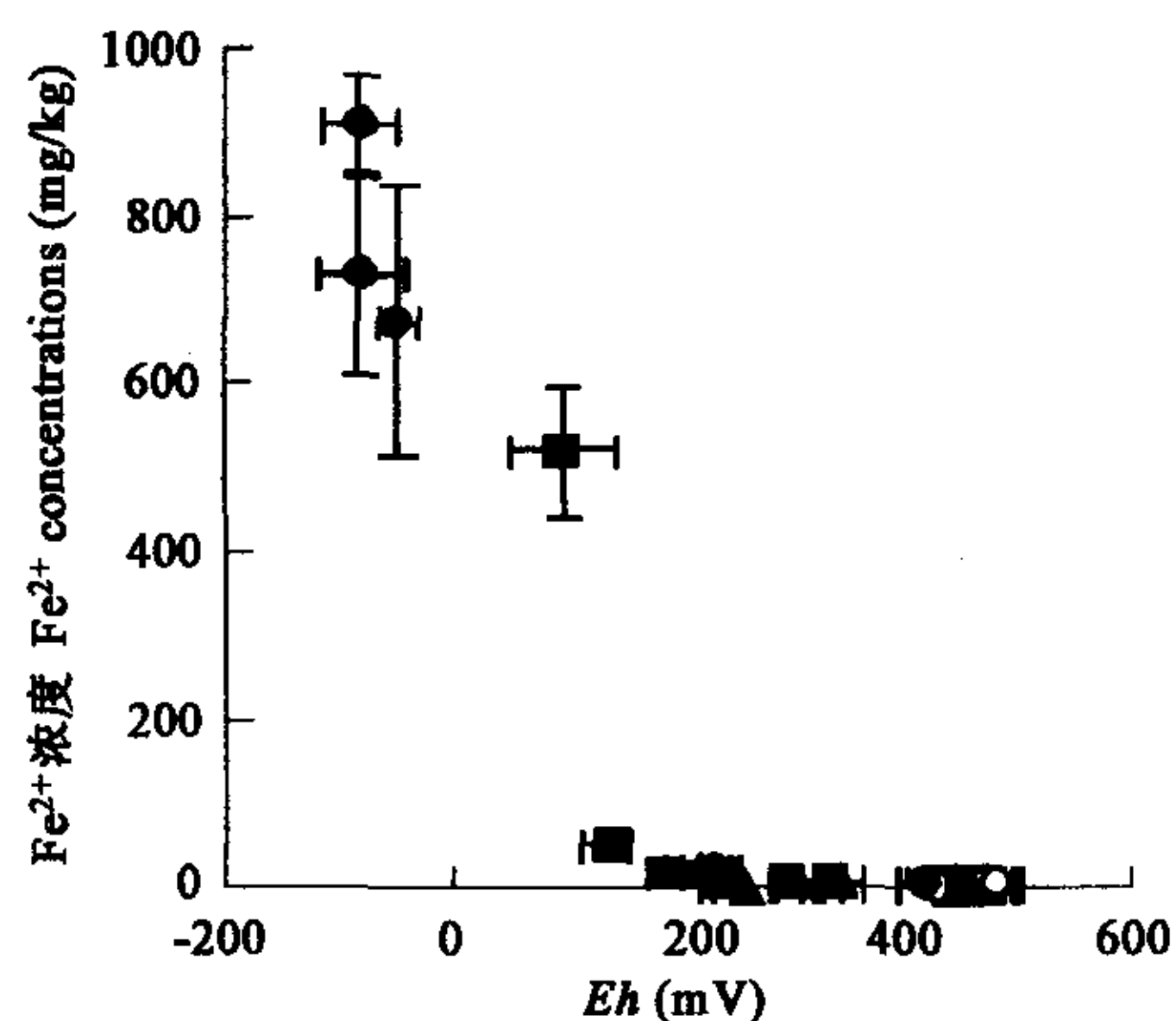


图 4 土壤 Fe^{2+} 浓度与 Eh 的关系

Fig. 4 Relationship between Fe^{2+} concentrations and Eh in soil

本试验结果表明,土壤 pH 值和 Eh 值之间存在着密切的 3 次方程式关系 ($P < 0.001$) (图 6)。这种关系说明,并不是所有的土壤在还原过程中 pH 值和 Eh 值始终是呈同步的变化关系,即负的直线相关关系^[30,33]。从图 6 可以看出,土壤 pH 值和 Eh 值的回归曲线可以划分为 3 个区间,在第 1 区间 ($\text{pH} < 6.5, Eh > 400 \text{ mV}$) 内, pH 值的变化幅度较大, Eh 值的变化幅度却较小, $\Delta Eh / \Delta \text{pH}$ 的比值 ($\Delta Eh / \Delta \text{pH}$) 约 150; 在第 2 区间 ($6.5 < \text{pH} < 6.9, 200 \text{ mV} (Eh < 400 \text{ mV})$) 内, pH 值和 Eh 值的变化几乎是同步的, $\Delta Eh / \Delta \text{pH}$ 的比值约 500; 在第 3 区间 ($6.9 < \text{pH} < 7.2, Eh < 200 \text{ mV}$) 内, pH 值的变化范围较小,可是 Eh 值的变化范围较大, $\Delta Eh / \Delta \text{pH}$ 的比值约 1000。从以上现象不难推测,土壤在淹水条件下发生还原反应,并在不同的还原阶段产生不同的还原物质,这些不同的还原性物质对 pH 值的作用力是不相同的。正如前文所说,在淹水的早期,由于土壤中原有的硝态氮的消失而强烈影响 pH 值的变化,但是随着还原程度的不断加剧,即其他物质被还原后,它们对 pH 值的作用力却相对较弱,直至 pH 值接近于 7 左右时,保持基本不变,但此时 Eh 值的变化幅度却较大。

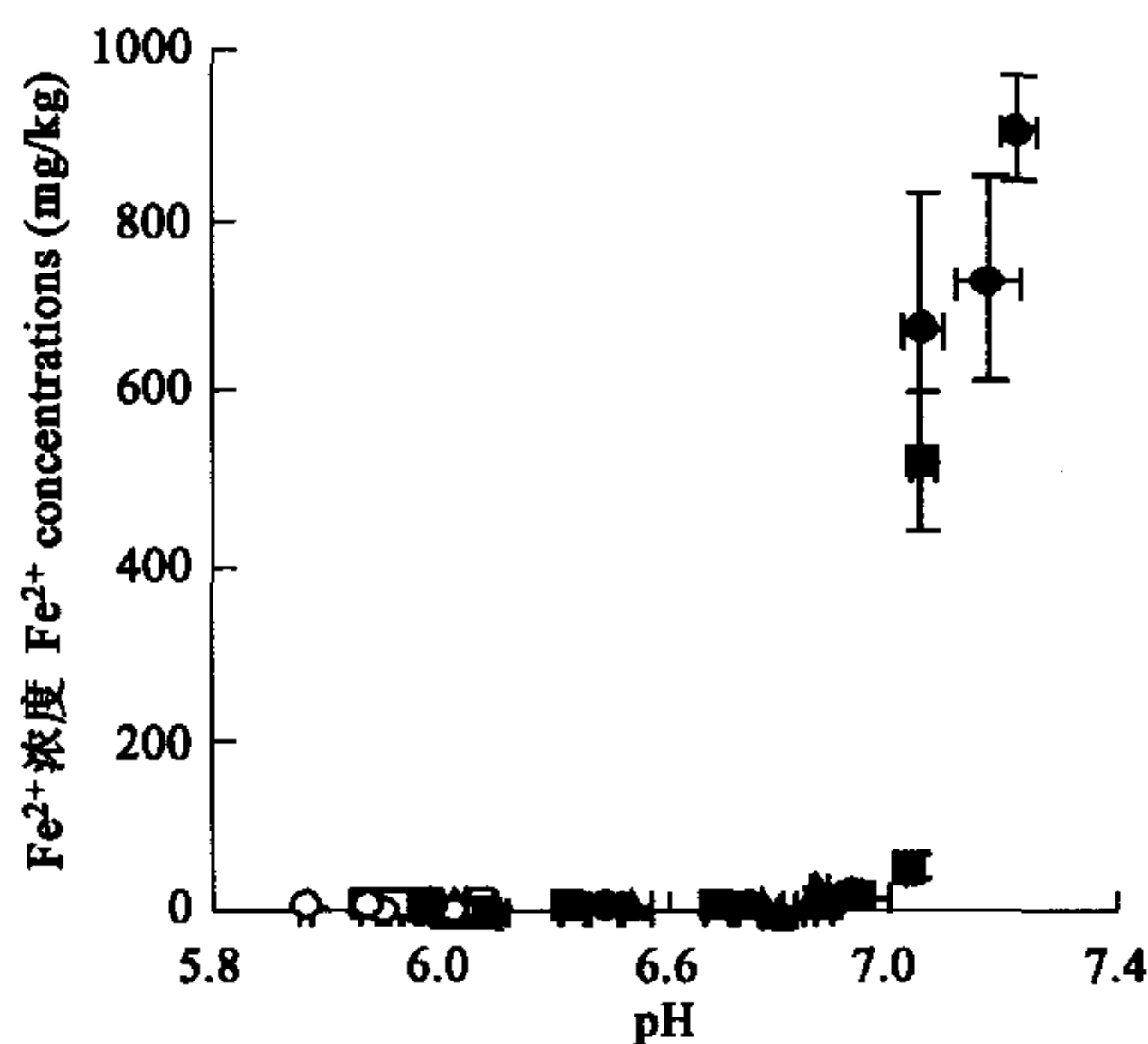


图 5 土壤 Fe^{2+} 浓度与 pH 的关系

Fig. 5 Relationship between Fe^{2+} concentrations and pH in soil

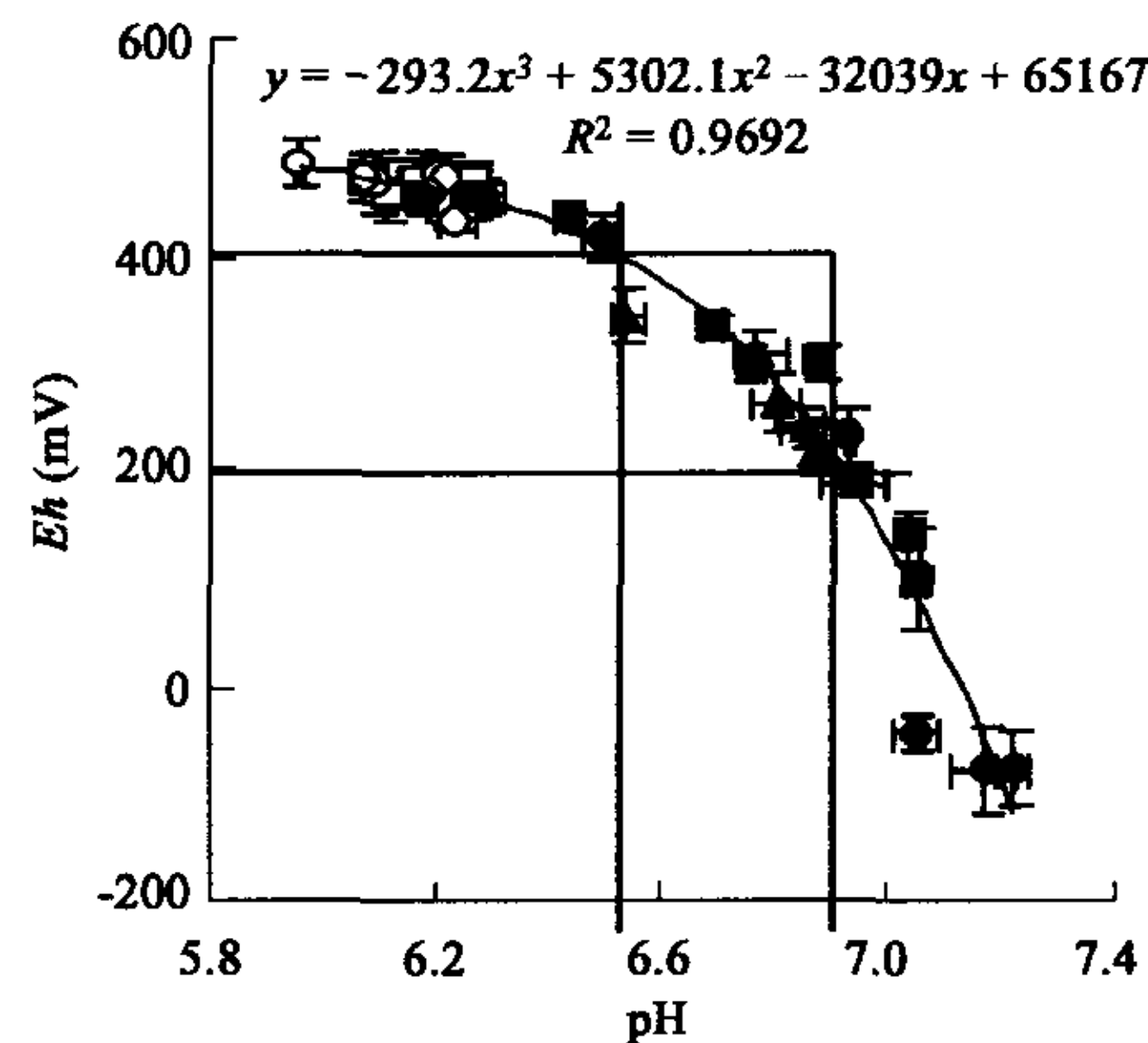


图 6 土壤 Eh 与 pH 的关系

Fig. 6 Relationship between Eh and pH in soil

References:

- [1] Asami T. Study on free iron in paddy soils 1. relationships between deoxidization of free iron and organic matter in paddy soils. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 1970, **41**(1):1~6.
- [2] Kawaguchi K. *Paddy soils*. Tokyo: Kodansha, 1978.
- [3] Nanjing institute of soil science. *Soils of China: their use and improvement, nature of fertility and soil properties, and genesis, classification and distribution*. Beijing: Science Press, 1980.
- [4] Ponnamperna F N. The chemistry of submerged soils. *Adv. Agron.*, 1972, **24**:29~96.
- [5] Hseu Z Y, Chen Z S. Saturation, reduction and redox morphology of seasonally flooded Alfisols in Taiwan. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, **60**:941~949.
- [6] Reynolds J G, Naylor D V, Fendorf S E. Arsenic sorption in phosphate-amended soils during flooding and subsequent aeration. *Soil Sci.*

Soc. Am. J., 1999, **63**:1149~1156.

- [7] Yamane I, Hamada R, Yoshinaga N, *et al.* *Soils*. Tokyo:Buneidou Press, 1984.
- [8] Higuchi K. Toward understanding iron homeostasis in plants. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 2003, **74**(2):237~242.
- [9] MacRae W D, Yoder O C. Iron specifically protects corn protoplasts from T-toxin of *Cochliobolus heterostrophus*. *Plant Physiol.*, 1987, **84**:1257~1264.
- [10] Yu T L, Liu W L. Studies on oxidation-reduction processes in paddy soils (3) Influence of oxidation-reduction conditions of the soil on the growth of rice. *Acta Pedologica Sinica*, 1957, **5**(4):292~304.
- [11] Ponnamperna F N, Bradfield R, Peech M. Physiological disease of rice attributable to iron toxicity. *Nature*, 1955, **175**:265.
- [12] Japanese society of soil science and plant nutrition. *Their use of soil from paddy to farm*. Tokyo:Hakuyusha, 1979.
- [13] Trettin C C, Jurgensen M F, Grigal D F, *et al.* Northern forested wetlands ecology and management. Boca Raton: CRC Press Inc., 1997.
- [14] Messina M G, Conner W H. *Southern forested wetlands ecology and management*. Boca Raton: CRC Press Inc., 1998.
- [15] Kozlowski T T. *Flooding and plant growth*. Orlando: Academic Press Inc., 1984.
- [16] Pezeshki S R, Delaune R D, Anderson P H. Effect of flooding on elemental uptake and biomass allocation in seedlings of three bottomland tree species. *J. Plant Nutr.*, 1999, **22**:1481~1494.
- [17] Xu Y J, Rohrig E, Folster H. Reaction of root systems of grand fir (*Abies grandis* Lindl.) and Norway spruce (*Picea abies* Karst.) to seasonal waterlogging. *For. Ecol. Manage.*, 1997, **93**:9~19.
- [18] McKevlin M R, Hook D D, McKee W H, *et al.* Loblolly pine seedling root anatomy and iron accumulation as affected by soil waterlogging. *Can. J. For. Res.*, 1987, **17**:1257~1264.
- [19] Tang L Z, Huang B L, Sun Y L, *et al.* Growth and nutrient properties of pondcypress (*Taxodium ascendens* Brongn.) wetland plantation in Lixiahe region, Jiangsu Province, China. *Jpn. J. For. Soc.*, 2003, **85**(2):127~134.
- [20] Lei W J. Soil genesis and improvement in Lixiahe area, Jiangsu Province. *Acta Pedologica Sinica*, 1959, **7**(3, 4):227~236.
- [21] Li L M. Nitrification and its influencing factors in some soil types in Taihu area. *Soils*, 1987, **19**(6):289~293.
- [22] Toda H, Haibara K, Ohsato M, *et al.* Characteristics of nitrogen mineralization in soil of Sugi and Hinoki stands. *Forest Resources Environ.*, 1996, **34**:45~54.
- [23] Toda H, Shimada H, Haibara K. Characteristics of carbon mineralization in disturbed and undisturbed incubations of forest soil. *Jpn. J. For. Environment*, 1997, **39**(1):36~45.
- [24] Toda H, Abe T, Haibara K. Carbon mineralization kinetics in forest soil. *Japanese Journal of Ecology*, 1997, **47**:109~119.
- [25] Bowden R D, Newkirk K M, Rullo G M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions. *Soil Biol. Biochem.*, 1998, **30**(12):1591~1598.
- [26] Oyanagi N, Chihara M, Toda H, *et al.* Characteristics of carbon and nitrogen mineralization of forest soils in different slopes and vegetation. *J. Jpn. For. Soc.*, 2002, **84**(2):111~119.
- [27] Zhang S L, Yang X Y, Lu D Q, *et al.* Effect of soil moisture, temperature and different nitrogen fertilizers on nitrification. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(12):2147~2153.
- [28] Kumada K, Asami T. A new method for determining ferrous iron in paddy soils. *Soil and Plant Food*, 1958, **3**:187~193.
- [29] Pan S Z. Transformation of materials in gleyed paddy soils and classification. In: Ma Y J, Chen J F eds. *Change in paddy soil materials and its effect on eco-environment*. Beijing: Science Press, 1999. 145~158.
- [30] Narteh L T, Sahrawat K L. Influence of flooding on electrochemical and chemical properties of West African soils. *Geoderma*, 1999, **87**:179~207.
- [31] Reddy K R, Patrick W H Jr. Effect of alternate aerobic and anaerobic conditions on redox potential, organic matter decomposition and nitrogen loss in a flooded soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1975, **7**:87~94.
- [32] Asami T. Study on free iron in paddy soils (2) effects of deoxidization of free iron on redox potential, pH value and ammonia formation in paddy soils. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 1970, **41**(1):7~11.
- [33] Asami T. Study on free iron in paddy soils (3) relationships between ferrous iron, redox potential and pH value in paddy soils. *Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 1970, **41**(2):45~47.
- [34] Gotoh S, Patrick W H. Transformation of iron in a waterlogged soil as influenced by redox potential and pH. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1974, **38**:66~71.
- [35] Holford I C R, Patrick W H. Effects of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in an acid soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1979, **43**:292~297.
- [36] Willett I R, Cunningham R B. Influence of sorbed phosphate on the stability of ferrous hydrous oxides under controlled pH and Eh conditions. *Aust. J. Soil Res.*, 1983, **21**:301~308.

参考文献:

- [3] 南京土壤研究所主编. 中国土壤:改良利用,性质,肥沃度,生成分类. 北京:科学出版社, 1980.
- [10] 于天仁,刘畹兰. 水稻土中氧化还原过程的研究 (3)氧化还原条件对水稻生长的影响. 土壤学报, 1957, **5**(4):292~304.
- [20] 雷文进. 江苏省里下河土壤的发生和改良. 土壤学报, 1959, **7**(3,4):227~236.
- [29] 潘淑贞. 潜育化水稻土物质的转化及其区分的指标体系. 见:马毅杰,陈家坊著. 水稻土物质变化与生态环境. 北京:科学出版社, 1999. 145~158.