

土壤地质 (八)

农业资源与环境领域 的地学问题研究

NONGYE ZIYUAN YU HUANJING LINGYU
DE DIXUE WENTI YANJIU

主 编 张杨珠

副主编 段建南 欧细满 刘海军

胡瑞芝 东野光亮

地 质 出 版 社

土壤地质 (八)

农业资源与环境领域的 地学问题研究

主 编 张杨珠
副主编 段建南 欧细满 刘海军
胡瑞芝 东野光亮



地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系 2002 年 10 月在湖南长沙召开的“中国土壤学会第九届土壤地质与资源环境学术讨论会”的参会论文选编,共收入论文 44 篇。内容包括:矿产资源的农业利用、农业地质背景与农业生态环境保护 and 农业高产优质生产、区域地质条件与土壤的发生分布和土地肥力、区域地质条件与土地的持续利用和社会经济的可持续发展以及新方法新技术在农业资源与环境领域的应用等。

本书可供农业、地质、地理、环境保护、土地生态、国土资源利用与管理等科技工作者及有关院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

农业资源与环境领域的地学问题研究/张杨珠主编. -北京:地质出版社, 2003.11
ISBN 7-116-03932-5

I. 农… II. 张… III. ①农业资源-研究②农业环境-研究 IV. ①S②X71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 094812 号

责任编辑:蔡卫东 何尧启

责任校对:罗红艳 田建茹

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324571 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@ gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787mm × 1092mm^{1/16}

印 张:15.75

字 数:360 千字

印 数:1—1200 册

版 次:2003 年 11 月北京第一版·第一次印刷

定 价:35.00 元

ISBN 7-116-03932-5/P·2429

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前 言

2002 年 10 月下旬,中国土壤学会土壤地质分专业委员会、湖南农业大学、湖南省土肥学会、湖南省土壤肥料研究所和湖南省土肥站共同主办了“全国第九届土壤地质与资源环境学术讨论会”。本次大会是进入 21 世纪之后,我国各族人民满怀喜悦豪情迎接中国共产党第十六次全国代表大会的召开,我国的社会主义现代化建设进一步向纵深发展,经济繁荣,国泰民安,人们重视高效利用资源,科学保护环境意识不断增强的形势下召开的。来自全国 16 个省(市、区)的 19 所高等院校和 6 所科研所等百余名专家学者紧紧围绕“土壤地质学与农业资源利用和农业环境保护”这一主题展开了热烈的学术讨论。大会共收到有关学术论文 60 余篇,它们包括了我国农业资源与环境领域的有关地学问题研究成果,具体包括以下几个方面的内容:①矿产资源的农业开发利用;②农业地质背景与农业生态环境保护和农业高产优质生产;③区域地质条件与土地的持续利用和社会经济的可持续发展;④区域地质条件与土壤发生分布和土壤肥力;⑤新方法新技术在农业资源与环境中的应用等。它们基本反映了参会代表近年来在全国不同地区各自的研究领域里所取得的研究成果,也代表了目前我国土壤地质科学领域的研究水平。

自 20 世纪 80 年代中期开始的两年一届的我国土壤地质学术讨论会活动是我国土壤地质科学研究创始人、浙江大学陆景冈教授发起的,至今已召开九届,出版过学术著作 7 部,为促进我国的土壤地质科学研究和发展发挥了重要的作用。从最初的单纯的土壤地质领域研究拓展为目前的农业资源与环境领域的地学问题研究是这一学术活动发展的总趋势,也是本次学术会议的最大特色。为了更好地巩固和宣传交流本次学术讨论会的学术成果,促进我国农业资源与环境领域的地学研究向纵深发展,使其更好地服务于我国社会经济的可持续发展和社会主义现代化建设,我们从中筛选了 44 篇论文编辑成集,以《农业资源与环境领域的地学问题研究》为书名,公开出版以飨读者。由于我们水平有限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

“全国第九届土壤地质学术讨论会”的召开和本书的出版,得到了中国土壤学会、湖南省科协、湖南农业大学、湖南省土肥学会、湖南省土肥站和湖南省土肥所的大力支持。在此,表示衷心感谢。

编 者

2003 年 5 月 16 日

目 录

前 言

I 农业矿产资源的开发利用

广东省天然沸石的特性及其应用研究	李华兴 张新明 李长洪 张方荣 卢维盛 刘远金 (1)
海泡石长效肥的功能分析	童潜明 (12)
天然沸石对滨海盐化土壤盐分的影响	周恩湘 姜 淳 魏 静 张桂银 (16)
几种天然养分载体的保肥供肥特性研究	张杨珠 陈军文 黄运湘 冯跃华 (20)
多元活性配方稀土微肥的研制及其在瓜果蔬菜上的应用效果	万 强 罗连光 彭先球 张秀菊 (28)
两种粘土矿物对作物青枯病和土壤微生物多样性的影响	蔡燕飞 蔡爱华 (33)

II 农业地质背景与农业的高产优质生产及生态环境保护

农业地质背景研究及其开发利用	周 俊 朱 江 (38)
重庆岩溶地区生态退化的研究	王 玲 谢德体 (45)
浅析泰山地区泥石流发生的地学原因	王霖琳 东野光亮 李艳华 (52)
矿区土地复垦与生态重建的环境条件分析——以平朔安太堡露天矿为例	白中科 林大仪 赵景远 张立城 李晋川 王文英 (57)
重庆岩溶地区土壤景观格局分析	屈双荣 杨剑虹 谢德体 李阳兵 (66)
突发性山地水土灾害与地形地貌的相关性研究	王深法 陈和平 愈建强 (73)
江西风化花岗岩区水土流失成因及生态恢复的思考	马 良 刘士余 左长清 (78)
山西省土壤退化及防治对策	贾宇平 段建南 (85)
洞庭湖区湿地处理城镇污水的可行性研究	胡茂永 刘春平 吴甫成 (90)
湖南省某些名特优产品的农业地质背景	申志军 (96)
桃江县地质环境与美女文化研究	吕焕哲 吴甫成 (98)
湖南农业地质灾害及其防治	黄祖明 周年发 (102)
湖南省土壤侵蚀类型分区及水土保持区划地学问题探讨	刘觉民 (109)

III 区域地质条件与土地持续利用和社会经济的可持续发展

地质学和土地学相结合利用土地	童潜明 胡东风 蔡悦林 (116)
对黄淮海平原农业发展的思考	郝晋珉 侯满平 刘平辉 李旭霖 李芳芳 (121)

产业结构变化对城市边缘区土地资源利用的影响研究——以北京市海淀区为例 郝晋珉 刘平辉 李旭霖 侯满平 田彦军 田志强 肖 霖 (129)

生态脆弱地区农业产业结构调整与农户土地利用变化研究——以江西省上饶县为例 王 鹏 黄贤金 张兆千 杨肇卫 (134)

小城镇土地利用环境效益的评价指标体系设计和评价——以重庆市北碚区为例 何 江 廖和平 刘洪斌 (142)

河北省人口和耕地压力与可持续发展 吕焕哲 吴甫成 (148)

集体所有制企业改制中土地资产处置与评估问题探讨 施 云 (153)

泰安市土地优化配置和集约利用 王 超 (156)

试论我国土地储备制度存在的问题与完善对策 朱红梅 陈卫兵 喻 瑶 刘 杰 (159)

泰安市耕地总量动态平衡潜力与区域平衡 刘晓东 (162)

浅议农业种植结构调整与耕地保护的关系 姜传东 张伟国 (166)

IV 区域地质条件与土壤发育和土壤肥力

北京市门头沟区的地质条件对土壤发育的影响 王 数 (171)

天山南侧棕漠土的发生特征研究 关 欣 张凤荣 钟骏平 李香云 (176)

不同母岩母质对土壤特性的影响 李惠卓 项宝珠 郭建军 (183)

耕地棕壤钾素固定与释放特征研究 梁成华 陈新之 罗 磊 魏丽萍 (189)

河北省退化山场的养分状况与培肥对策 周大迈 张月辰 任士魁 王英杰 (195)

湖南省主要旱耕地土壤的固定态铵含量及其影响因素 万大娟 冯跃华 黄运湘 张杨珠 (200)

稻作制、地下水位和绿肥施用量对土壤有效钼含量的影响 胡瑞芝 黄运湘 周 清 肖永兰 张杨珠 (206)

V 新技术新方法在农业资源与环境中的应用

GIS 支持下广东土地生产潜力的计算及空间分布 甘海华 范秀丹 吴顺辉 (211)

实现 GIS 技术与农用地估价在方法层面的结合 郝晋珉 李芳芳 (218)

聚类分析方法在乡镇驻地土地分等中的应用 刘洪义 东野光亮 (225)

土地利用总体规划编制中的几个问题讨论 邹自力 秦智慧 朱建军 (229)

VI 其 他

施用有机肥的改土效应研究 吴跃龙 苏 伟 曹梦奇 林蕴华 付 红 (233)

对“鱼-稻-菇”立体化农田经营模式的探索 陈建国 田小华 (238)

平菇稻草栽培残料还田对土壤的影响 陈建国 向国军 田 志 (241)

I 农业矿产资源的开发利用

广东省天然沸石的特性及其应用研究

李华兴 张新明 李长洪^① 张方荣^② 卢维盛 刘远金

(华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘 要 广东省天然沸石主要集中分布于和平县—龙川县的长塘火山岩断陷盆地内, 以丝光沸石和斜发沸石为主, 吸 K^+ 量为 $5.6 \sim 20.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 吸 NH_4^+ 量为 $100.4 \sim 188.7 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 沸石远景储藏量达 1 亿 t 以上。土柱淋洗试验表明, 沸石与肥料配施, 可明显提高土壤对肥料中 N 和 K 的保持能力, 减少速效 P 的固定; 盆栽试验表明, 施用天然沸石, 可显著提高土壤养分的生物有效性, 促进玉米的生长和对养分的吸收, 提高肥料的利用率; 室内模拟试验表明, 沸石对污水中的氨氮、总磷、 BOD_5 和 COD_{Cr} 等具有明显的净化效果; 作为饲料添加剂用于饲养鸡的试验表明, 添加沸石可降低鸡的死亡率, 促进鸡的生长, 同时还可降低鸡舍氨的浓度。

关键词 广东省 天然沸石 农业应用 土壤肥力 污水

1 引言

沸石是一族具有连通孔道, 呈架状构造的含水铝硅酸盐矿物。特殊的晶体化学结构使沸石具有离子交换和高效选择吸附性能, 因而在土壤改良和培肥、粪便除臭、饲料添加剂以及水处理等方面应用广泛 (王光火等, 1990; 史奕等, 1991; 李增新等, 1995)。广东省目前已发现有近 20 个矿床 (点), 天然沸石远景储藏量达 1 亿 t 以上, 但未有上规模的开发利用。本研究目的在于探讨广东省天然沸石在土壤保肥、污水处理以及饲料添加剂等方面的效果, 为推广应用广东较丰富的沸石资源提供理论依据。

① 现在佛山市园林管理处工作。

② 广东省地质矿产勘查开发局。

2 广东省天然沸石的分布及其特性

2.1 天然沸石的分布与储藏量

广东省目前已发现的沸石矿床(点)主要集中分布在和平县—龙川县的长塘火山岩断陷盆地内,大致呈椭圆状分布,东西长 32 km,南北宽 25.5 km,面积约 600 km²。沸石矿带主要环绕盆地边缘分布,已发现有近 20 个矿床(点)。在长塘盆地西南缘,即由和平上陵至贝墩,沸石矿带断续长 35 km;盆地东缘龙川贝岭下畲至曲桥矿带长 11 km;盆地北缘也已发现下车沸石矿带,该矿带长约 6 km。矿床类型为火山热液蚀变交代型沸石矿床。主要矿床有两处:龙川县下畲沸石矿床以及和平县上陵沸石矿床;主要矿点有和平县贝墩河明亮、下车河排、优胜水口以及龙川县车田增坑等矿点。沸石矿物主要有丝光沸石和斜发沸石。整个盆地沸石远景储藏量达 1 亿 t 以上。

2.2 天然沸石的主要特性

2.2.1 和平县上陵沸石矿床

综合 X 光衍射分析、差热分析、红外光谱、吸 NH₄⁺ 量和偏光镜下的鉴定结果,矿石中沸石含量为 45%~84.6%,其中主要是丝光沸石,少量斜发沸石;其次是蒙脱石、正长石和方解石等矿物,局部有伊利石和微量贝得石。矿石的密度一般在 1.85~2.34 g·cm⁻³,平均 2.08 g·cm⁻³。沸石的颗粒直径一般小于 0.2 mm,通常呈板状、微片状集合体,有时呈团块状,分布在未被完全蚀变的火山玻璃之间。沸石的吸 K⁺ 量最低 5.6 mg·g⁻¹,最高 20.7 mg·g⁻¹,平均为 13 mg·g⁻¹;吸 NH₄⁺ 量最低 100.4 cmol·kg⁻¹,最高 188.7 cmol·kg⁻¹,平均为 147 cmol·kg⁻¹。其平均化学成分为: $w(\text{SiO}_2)$ 69.36%、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 13.28%、 $w(\text{TiO}_2)$ 0.14%、 $w(\text{MgO})$ 0.59%、 $w(\text{CaO})$ 2.57%、 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 1.257%、 $w(\text{K}_2\text{O})$ 3.67%、 $w(\text{MnO}_2)$ 0.194%、 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 0.018%、 $w(\text{H}_2\text{O}^-)$ 3.90%、 $w(\text{H}_2\text{O}^+)$ 6.92%。

2.2.2 龙川县下畲沸石矿床

综合 X 光衍射分析、差热分析、红外光谱、吸 NH₄⁺ 量及镜下鉴定结果,矿石中沸石含量为 65%~78%,主要由斜发沸石、片沸石和丝光沸石组成,其中斜发沸石含量为 48%~57%、片沸石含量为 10%~12%、丝光沸石含量为 7%~9%;其次有石英、正长石、蒙脱石、钠长石、 γ -石英、方解石等矿物。矿石密度平均为 2.44 g·cm⁻³。沸石的粒径一般为 0.1 mm,沸石的颗粒通常呈板状、微片状集合体,有时呈团块状,分布在未被完全蚀变的火山玻璃之间。吸 K⁺ 量在 10 mg·g⁻¹ 以上,吸 NH₄⁺ 量 120~170 cmol·kg⁻¹;其主要化学成分: $w(\text{SiO}_2)$ 65.63%、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 12.83%、 $w(\text{TiO}_2)$ 0.177%、 $w(\text{MgO})$ 0.74%、 $w(\text{CaO})$ 3.01%、 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 0.447%、 $w(\text{K}_2\text{O})$ 1.96%、 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 0.113%、 $w(\text{Zn})$ 0.0119%、 $w(\text{Mn})$ 0.124%、 $w(\text{H}_2\text{O}^-)$ 7.493%、 $w(\text{H}_2\text{O}^+)$ 3.98%。

3 天然沸石对土壤保肥性能及养分生物有效性的影响

3.1 天然沸石对土壤保肥性能的影响

利用广东省有代表性的 4 种不同母质(花岗岩、玄武岩、砂页岩和石灰岩)发育的旱坡地土壤(0~15 cm)进行的模拟土柱淋洗试验(李华兴等, 2001a),研究天然沸石对土

壤保肥能力的影响。

3.1.1 天然沸石对氮、钾养分淋失量的影响

土柱淋洗试验结果表明（表 1），随着沸石施用量的增加，淋洗液中的氮、钾含量随之显著降低，这说明沸石对 4 种不同土壤的有效氮、钾的保持能力都有不同程度的提高。在不同的土壤中，沸石不同用量对 4 种不同土壤有效氮淋失量的影响不同，其顺序为：砂页岩赤红壤 > 花岗岩赤红壤 > 玄武岩砖红壤 > 石灰岩赤红壤。这与土壤质地、阳离子交换量和土壤本身有效氮含量有关。砂页岩赤红壤和花岗岩赤红壤土壤的粘粒含量和阳离子交换量也较小，土壤原有的保肥能力较弱，而本身的有效氮较多，因此，不同沸石用量对这两种土壤的保氮效果影响最显著；而石灰岩赤红壤和玄武岩砖红壤由于粘粒含量和阳离子交换量最高，土壤原有的保肥能力较强，而土壤有效氮较低，因此，不同沸石用量对它们氮素淋失量的影响差异不如前两种土壤明显。

表 1 4 种土壤模拟土柱淋洗液的累计含氮和钾总量 （单位：mg·kg⁻¹）

处理	花岗岩赤红壤		玄武岩砖红壤		石灰岩赤红壤		砂页岩赤红壤	
	N	K	N	K	N	K	N	K
CK	110.9a	19.8a	74.4a	15.9a	103.6a	36.8a	150.4a	24.7a
Z1	99.1b	18.4ab	58.8b	13.5b	90.5b	32.1b	136.2b	21.6b
Z2	94.9bc	17.6ab	55.6c	12.9b	84.7c	30.3bc	126.5c	21.1b
Z3	92.0cd	17.0bc	55.0c	12.8b	84.0c	29.2cd	120.0cd	20.3bc
Z4	89.1d	15.8c	53.5c	11.7c	83.4c	28.0d	114.6d	19.4bc
Z5	80.6e	15.1c	50.5d	10.6d	83.0c	23.2e	105.6e	18.3c

注：1. CK, Z1, Z2, Z3, Z4, Z5 分别表示每 kg 土施 0, 1, 3, 6, 12 和 20g 沸石；2. 数据多重比较采用 SSR 法（P<0.05），同列数据中具有相同字母者表示无显著性差异（下同）。

同样，沸石不同用量对 4 种不同土壤有效钾淋失量的影响不同，其中沸石对石灰岩赤红壤有效钾淋失量的影响最明显，其余依次是砂页岩赤红壤、玄武岩砖红壤和花岗岩赤红壤。这主要是因为石灰岩赤红壤有效钾含量较高，土壤对肥料中钾的吸附能力相对较差，不施沸石的土壤钾的淋洗损失比较多，因而施用沸石处理后，则能显著降低钾的淋失；而其余 3 种土壤的有效钾含量较低，土壤对肥料中钾的吸附能力相对较强，因此，不同沸石的保肥效果差异不显著。

3.1.2 沸石对土壤的有效 N、P、K 残留量的影响

经淋洗后土壤的分析结果（表 2）可以看出，施加沸石的土壤有效氮、磷、钾残留量比不施沸石的土壤都有显著提高，且随着沸石用量的增加，土壤有效氮、磷、钾的含量提高，这表明沸石具有显著的保肥效果。这与张继宏等（1994）的研究结果是一致的，可能与天然沸石的空间结构和较强的离子交换性和吸附性有关。

3.1.3 沸石对土壤无机磷组分及水溶性磷含量的影响

花岗岩赤红壤模拟土柱淋洗后土壤无机磷组分测定结果（表 3）表明，沸石和肥料混合使用，土壤中 Al-P 和 Fe-P 含量随着沸石用量的增加而显著增加，但 O-P 和 Ca-P 则没有明显变化，这说明磷肥与沸石混施后，磷素大部分是以磷酸铝、铁的形式存在。此外，

表 2 不同土壤模拟土柱淋洗后土壤有效氮、磷和钾的含量 (单位: $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理	花岗岩赤红壤			玄武岩砖红壤			石灰岩赤红壤			砂页岩赤红壤		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
CK	128.1c	37.0b	65.2d	101.2c	44.5d	129.1d	92.2b	29.0b	162.8d	164.3c	33.9c	117.4d
Z1	139.3b	42.7a	70.8c	115.3b	50.4c	132.2c	101.1ab	35.6a	167.2c	173.4bc	38.7b	123.6c
Z2	144.2b	43.4a	73.1c	117.1b	51.7bc	135.1bc	106.3a	36.4a	175.6bc	176.2b	40.2b	129.4c
Z3	149.4ab	43.9a	78.2bc	119.5b	54.5ab	136.3b	108.2a	36.8a	180.5b	181.2ab	41.8b	138.0b
Z4	153.5a	45.1a	83.6b	122.1b	53.4ab	139.2b	110.3a	38.1a	184.5b	187.5a	42.2b	143.2a
Z5	158.3a	45.6a	88.9a	125.0a	56.3a	146.4a	112.1a	38.9a	190.1a	194.1a	46.2a	145.0a

表 3 花岗岩赤红壤土柱淋洗后土壤中无机磷组分及水溶性磷的变化

(单位: $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处 理	铝 磷	铁 磷	闭蓄态磷	钙 磷	水溶性磷
CK	156.6d	82.6c	95.8	11.4	5.3c
Z1	177.4c	90.2b	91.0	11.3	6.3b
Z2	180.9bc	97.8ab	91.4	11.1	6.4b
Z3	182.7b	98.2ab	93.7	11.5	6.6ab
Z4	188.3a	103.1a	93.8	10.8	6.6ab
Z5	194.4a	103.8a	92.2	11.2	6.9a

沸石还能显著地提高土壤中水溶性磷的含量, 增强磷肥的生物有效性。

3.2 天然沸石对土壤养分生物有效性的影响

在淋洗试验的基础上, 以花岗岩赤红壤作供试土壤进行了盆栽试验, 研究沸石对土壤养分生物有效性和土壤化学性质的影响试验 (李华兴等, 2001b; 李长洪等, 2002)。

3.2.1 沸石对玉米植株形态和生物量的影响

从表 4 可以看出, 在 N、P、K 养分施用量相同的条件下, 肥料与沸石混施可显著地提高玉米的地上部和地下部的生物量。在第一造试验中, 不同沸石施用量 (Z1、Z2、Z3) 处理间的玉米生物量差异不显著, 而第二造试验混施中、高量沸石 (Z2 和 Z3) 处理玉米地上部和地下部的生物量都比混施低量沸石处理 (Z1) 显著提高。

表 4 不同沸石用量对玉米生长的影响

处理	第一造			第二造		
	株高 cm	地上部干重 $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$	地下部干重 $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$	株高 cm	地上部干重 $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$	地下部干重 $\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$
CK	70.5b	5.83b	0.75b	54.2b	3.90c	2.89c
Z1	74.8ab	7.00a	1.02a	56.5ab	4.23b	2.96c
Z2	75.7a	6.81a	1.04a	59.6a	5.42a	3.47b
Z3	77.3a	6.86a	1.08a	58.6a	5.41a	4.78a

注: 1. CK、Z1、Z2、Z3 分别表示每千克土施 0、0.7、1.0、1.3g 沸石; 2. 收获时间为播种后 32 d。

3.2.2 沸石对玉米吸收养分的影响

试验结果（表 5）表明，与对照（CK）相比，配施沸石提高了玉米对氮、磷、钾的吸收总量，其中高量沸石处理（Z3）与对照的差异都达显著水平。这表明，沸石能提高土壤养分的生物有效性。

表 5 沸石对玉米养分吸收量的影响 (单位: mg·pot⁻¹)

处理	第一造			第二造		
	N	P	K	N	P	K
CK	192.9c	15.5c	108.2b	81.1b	10.3b	38.5b
Z1	233.8a	20.3b	111.0b	101.3ab	10.2b	36.5b
Z2	226.8b	19.9b	106.1b	117.6a	13.9a	45.0a
Z3	227.7ab	21.1a	128.3a	112.0a	14.3a	45.2a

3.2.3 沸石对氮肥利用率的影响

从表 6 可以看出，配施沸石可显著地提高玉米的¹⁵N 丰度（¹⁵N/%）、原子百分超（Ndff/%）和吸收肥料中氮的总量（Ndff/mg），显著地提高了玉米对氮肥的利用率（FUE/%）。第一造氮肥利用率比对照提高了 20.1% ~ 28.7%，其中以低量沸石处理（Z1）的氮肥利用率最高。第二造氮肥利用率比对照提高了 34.3% ~ 60.0%，其中以中量沸石处理（Z2）的氮肥利用率最高。

表 6 不同沸石剂量对玉米¹⁵N 丰度和氮肥利用率的影响

处理	第一造					第二造				
	¹⁵ N/%	Ndff/%	Ndff/mg	FUE/%	提高率/%	¹⁵ N/%	Ndff/%	Ndff/mg	FUE/%	提高率/%
CK	2.678b	56.0	108.0	24.0	0	1.981b	38.9	31.5	7.0	0
Z1	2.822a	59.4	138.9	30.9	28.7	2.093ab	41.7	42.2	9.4	34.3
Z2	2.774ab	58.3	132.2	29.4	22.5	2.143a	42.9	50.5	11.2	60.0
Z3	2.725ab	57.1	130.0	28.9	20.1	2.169a	43.5	48.7	10.8	54.3

3.3 对土壤化学性质的影响

种植两造玉米后的土壤分析结果（表 7）表明，土壤的阳离子交换量、交换性 Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺、盐基饱和度和 pH 值都随着沸石施用量的增加而提高，其中以交换性 Na⁺ 和交换性 K⁺ 提高最显著，这与沸石本身含有较高的钠离子和钾离子有关。沸石可以提高土壤的阳离子交换量和盐基饱和度，对于提高土壤的保肥供肥性能具有重要的作用。

表 7 沸石对土壤化学性质的影响

处 理	交换性 Na ⁺	交换性 K ⁺	交换性 Ca ²⁺	交换性 Mg ²⁺	阳离子交换量	盐基饱和度	pH 值
	mg·kg ⁻¹				cmol·kg ⁻¹	%	
CK	136.5c	47.0c	111.0	4.5	5.43c	21.7c	4.71b
Z1	175.5b	48.0bc	114.0	4.5	5.56b	24.5b	4.81a
Z2	201.5a	50.5b	121.0	5.1	5.65b	26.8ab	4.80a
Z3	219.0a	56.1a	131.0	5.1	5.86a	27.8a	4.84a

4 沸石对水质净化的影响

试验在室内进行，供试的天然沸石以丝光沸石为主，吸氮量约 1340 mmol.kg⁻¹（刘远金等，2002a，2002b），活化沸石据孙家寿等（1996）自行制备，水质测定方法按照国家环保局《水和废水监测分析方法》（1998）进行。

4.1 天然沸石对污水中的氮磷去除效果

4.1.1 不同沸石用量对污水中氮磷的净化效果

4.1.1.1 对餐厅污水的净化效果

从表 8 可以看出，沸石有降低总 N、氨氮、总 P、无机 P 的作用，并随着沸石用量的增加而降低程度越大。其中对总 P 和无机 P 效果较明显，在沸石用量为 2.5 g·L⁻¹时，去除率分别为 67.90% 和 67.69%；对氨氮也有一定的效果，在沸石用量为 2.5 g·L⁻¹时，去除率为 38.32%；但对总氮的效果不明显，去除率仅为 0.26% ~ 2.36%。

表 8 沸石 (g·L⁻¹) 对餐厅污水氮磷 (μg·mL⁻¹) 的影响

项 目	0	1.0	去除率/%	2.5	去除率/%
总 N	2.708	2.701	0.26	2.644	2.36
氨氮	1.331	1.269	4.66	0.821	38.32
总 P	2.056	1.829	11.04	0.660	67.90
无机 P	1.365	1.253	8.21	0.441	67.69

注：沸石粒径为 80 目，处理时间为 1 d，表 9、10 同。

4.1.1.2 对鱼塘水的净化效果

从表 9 可以看出，与餐厅污水相似，鱼塘水中总 N、氨氮、总 P、无机 P 随着沸石用量的增加而降低。但与前者不同的是，沸石对氨氮的净化效果最好，去除率达 83.86%；而对无机 P 效果相对较差，去除率仅为 15.23% ~ 30.46%，这可能与鱼塘水中所含 N、P 的浓度较低有关。

表 9 沸石处理 (g·L⁻¹) 对鱼塘水氮磷 (μg·mL⁻¹) 的影响

项 目	0	1.0	去除率/%	2.5	去除率/%
总 N	0.744	0.575	22.72	0.302	59.41
氨氮	0.632	0.471	25.47	0.102	83.86
总 P	0.324	0.206	36.42	0.149	54.01
无机 P	0.197	0.167	15.23	0.137	30.46

4.1.1.3 对生活污水的净化效果

从表 10 可以看出，生活污水中所含 N、P 的浓度相对较高，沸石的净化效果相对餐厅水和鱼塘水而言较差。在沸石用量为 2.5 g·L⁻¹时，对总 N、氨氮、总 P、无机 P 的去除率分别只有 1.13%、14.55%、17.15% 和 19.47%。

表 10 沸石处理 (g·L⁻¹) 对生活污水氮磷 (μg·mL⁻¹) 的影响

项 目	0	1.0	去除率/%	2.5	去除率/%
总 N	5.510	5.498	0.22	5.448	1.13
氨氮	3.760	3.542	5.80	3.213	14.55
总 P	3.994	3.509	12.14	3.309	17.15
无机 P	2.434	2.344	3.70	1.960	19.47

4.1.2 不同粒度沸石对养金鱼水氮磷去除效果

4.1.2.1 对总 N 的影响

从表 11 可以看出，不加沸石的养金鱼水中总 N 含量随着时间的推移而增多。加了粉状沸石之后，5 d 时较不加沸石的处理降低了 45.09%，10 d 时降低了 68.37%，15 d 时降低了 73.25%；加块状沸石之后，5 d 时较不加沸石的处理降低了 25.61%，10 d 时降低了 61.48%，15 d 时降低了 78.09%。粉状沸石前期对总 N 的净化能力比块状沸石强，但到 15 d 时块状沸石的净化能力反而超过了粉状沸石。

表 11 用沸石处理养金鱼水中总 N 的含量变化 (单位: μg·mL⁻¹)

处 理	5 d	10 d	15 d
不加沸石	0.570	0.784	0.972
加粉状沸石	0.313	0.248	0.260
加块状沸石	0.424	0.302	0.213

注：沸石用量为 2.5 g·L⁻¹；粉状沸石粒径为 80 目，块状沸石为 1~3 mm；表 12~14 同。

4.1.2.2 对氨氮的影响

从表 12 可以看出，不加沸石的养金鱼水中氨氮含量也随着时间的推移而增多。加了粉状沸石之后，5 d 时较不加沸石的处理降低了 40.12%，10 d 时降低了 69.32%，15 d 时降低了 74.17%；加块状沸石之后氨氮含量也有所下降，但程度比不上粉状沸石，5 d 时较不加沸石的处理下降了 30.98%，10 d 时下降了 55.19%，15 d 时下降了 71.41%。

表 12 用沸石处理养金鱼水中氨氮的含量变化 (单位: μg·mL⁻¹)

处 理	5 d	10 d	15 d
不加沸石	0.481	0.665	0.724
加粉状沸石	0.288	0.204	0.187
加块状沸石	0.332	0.298	0.207

4.1.2.3 对总 P 的影响

从表 13 可以看出，不加沸石的养金鱼水中总 P 含量也随着时间的推移而增多。加了粉状沸石之后，5 d 时较不加沸石的处理降低了 16.09%，10 d 时降低了 67.51%，但 15 d 时，降低了 68.15%；加块状沸石之后，5 d 时较不加沸石的处理下降了 7.41%，10 d 时下

降了 60.56%，15 d 时下降了 70.21%。与总 N 相似，粉状沸石前期对总 P 的净化能力比块状沸石强，但到 15 d 时块状沸石的净化能力反而超过了粉状沸石。

表 13 用沸石处理养金鱼水中总 P 的含量变化 (单位: $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)

处 理	5 d	10 d	15 d
不加沸石	0.553	0.791	0.923
加粉状沸石	0.464	0.257	0.294
加块状沸石	0.512	0.312	0.275

4.1.2.4 对无机 P 的影响

从表 14 可以看出，不加沸石的养金鱼水中无机 P 含量也随着时间的推移而增多。加了粉状沸石之后，5 d 时较不加沸石的处理降低了 17.23%，10 d 时降低了 57.36%，但 15 d 时降低了 66.81%；加块状沸石之后，5 d 时较不加沸石的处理下降了 6.07%，10 d 时下降了 50.01%，15 d 时下降了 70.45%。与总 N 和总 P 相似，粉状沸石前期对无机 P 的净化能力比块状沸石强，但到 15 d 时块状沸石的净化能力反而超过了粉状沸石。

表 14 用沸石处理养金鱼水中无机 P 的含量变化 (单位: $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)

处 理	5 d	10 d	15 d
不加沸石	0.412	0.523	0.714
加粉状沸石	0.341	0.223	0.237
加块状沸石	0.387	0.251	0.211

4.2 沸石对生活污水中 BOD_5 和 COD_{cr} 的影响

4.2.1 不同用量天然沸石对污水的影响

试验结果(表 15)表明，加入天然沸石可以显著降低污水的 BOD_5 和 COD_{cr} ，且随着沸石用量的增加，污水的 BOD_5 和 COD_{cr} 降低，而 $2.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的沸石用量之间的效果差异不显著。因此，对生活污水处理的适宜沸石用量为 $2.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。但是，从 BOD_5 和 COD_{cr} 的去除率来看，天然沸石对 BOD_5 的去除效果较好，而对 COD_{cr} 的去除效果则不理想。

表 15 不同沸石用量对生活污水 BOD_5 和 COD_{cr} 的净化效果

沸石用量 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	BOD_5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	去除率 %	COD_{cr} $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	去除率 %
0	$21.14 \pm 0.91\text{a}$	0	$241.12 \pm 1.46\text{a}$	0
2.0	$14.67 \pm 0.31\text{b}$	31.6	$225.31 \pm 1.23\text{b}$	6.4
2.5	$9.91 \pm 0.06\text{c}$	53.8	$221.71 \pm 0.12\text{c}$	8.0
3.0	$8.77 \pm 0.13\text{c}$	58.5	$219.78 \pm 0.72\text{c}$	8.9

注：沸石粒径为 80 目，处理时间为 24 h，表 16 同。

4.2.2 不同粒径天然沸石对污水净化效果的影响

试验结果（表 16）表明，天然沸石不同粒径对污水的 COD_{cr} 的净化效果有显著的影响，沸石粒径越小， COD_{cr} 越小，去除率越大，但不同粒径天然沸石对污水的 BOD_5 的净化效果差异不明显。

表 16 不同粒径天然沸石对生活污水 BOD_5 和 COD_{cr} 的净化效果

沸石粒径	$\frac{BOD_5}{mg \cdot L^{-1}}$	$\frac{去除率}{\%}$	$\frac{COD_{cr}}{mg \cdot L^{-1}}$	$\frac{去除率}{\%}$
不加沸石	$20.21 \pm 0.26a$	0	$253.31 \pm 1.94a$	0
60 目	$12.24 \pm 0.03b$	39.4	$238.11 \pm 0.70b$	6.0
80 目	$12.17 \pm 0.01b$	39.8	$231.78 \pm 0.26c$	8.5
100 目	$12.17 \pm 0.02b$	39.8	$225.19 \pm 0.56d$	11.1

4.2.3 活化沸石与天然沸石对污水的净化效果的比较

试验结果（表 17、18）表明，活化沸石对污水的 BOD_5 和 COD_{cr} 的净化效果比天然沸石显著提高，而且对污水的净化作用在 24 h 后就能达到较明显的效果，污水中的 BOD_5 和 COD_{cr} 与处理 48 h 后无明显的差异，但天然沸石处理 48 h 后污水中 BOD_5 和 COD_{cr} 都显著低于处理 24 h 后的污水。

表 17 活化沸石与天然沸石对生活污水 BOD_5 的净化效果比较

处 理	投放沸石前	处理 24 h 后		处理 48 h 后	
	$\frac{COD_{cr}}{mg \cdot L^{-1}}$	$\frac{COD_{cr}}{mg \cdot L^{-1}}$	$\frac{去除率}{\%}$	$\frac{COD_{cr}}{mg \cdot L^{-1}}$	$\frac{去除率}{\%}$
不加沸石	24.43 ± 0.65	$18.19 \pm 0.10a$	0	$13.76 \pm 0.68a$	0
加入天然沸石	$24.43 \pm 0.65a$	$11.45 \pm 0.12 b (b)$	37.1	$8.57 \pm 0.04 b (c)$	37.8
加入活化沸石	$24.43 \pm 0.65a$	$6.64 \pm 0.01 c (b)$	63.5	$6.64 \pm 0.01 c (b)$	51.7

注：沸石粒径为 80 目，用量为 $2.5 g \cdot L^{-1}$ ，表 18 同。

表 18 活化沸石与天然沸石对生活污水 COD_{cr} 的净化效果比较

处 理	投放沸石前	处理 24 h 后		处理 48 h 后	
	$\frac{COD_{cr}}{mg \cdot L^{-1}}$	$\frac{COD_{cr}}{mg \cdot L^{-1}}$	$\frac{去除率}{\%}$	$\frac{COD_{cr}}{mg \cdot L^{-1}}$	$\frac{去除率}{\%}$
加沸石	288.93 ± 1.36	$275.26 \pm 0.86 a$	0	$266.58 \pm 0.67 a$	0
加天然沸石	$288.93 \pm 1.36a$	$256.37 \pm 0.80 b (b)$	6.9	$219.68 \pm 0.16 b (c)$	17.5
加活化沸石	$288.93 \pm 1.36a$	$178.39 \pm 0.49 c (b)$	35.2	$175.62 \pm 0.39 c (b)$	34.2

5 天然沸石作饲料添加剂的效果

天然沸石按一定比例添加于饲料中，研究沸石作饲料添加剂对饲养鸡生长的影响。

5.1 天然沸石作饲料添加剂对鸡生长的影响

沸石粉替代饲料 5% 在 3 个处理（3%、5% 和 7%）中效果最佳，可以使幼鸡的体重增加 19.8%（表 19），死亡率下降 67%（表 20），肉料比亦有所降低（表 21），并且节省 5% 的饲料，从而产生了显著的经济效益。

表 19 沸石不同用量对幼鸡增重的影响

沸石处理	幼鸡数量 只	始重 g	末重 g	增重 g	比对照	
					增重/g	增重率/%
对照	100	112	1782 ± 9	1670 ± 9		
3%	100	115	2089 ± 8	1974 ± 8	304	18.2
5%	100	113	2114 ± 6	2001 ± 6	331	19.8
7%	100	114	1987 ± 5	1873 ± 5	203	12.2

表 20 沸石不同用量对幼鸡死亡率的影响

沸石处理	幼鸡数量 只	存活只数 只	死亡只数 只	死亡率 %
对照	100	94	6	6
3%	100	98	2	2
5%	100	98	2	2
7%	100	96	4	4

表 21 沸石不同用量对幼鸡肉料比的影响

沸石处理	增重/g	用料/g	肉料比
对照	1670 ± 9	94	1:2.4
3%	1974 ± 8	98	1:2.15
5%	2001 ± 6	98	1:2.1
7%	1873 ± 5	96	1:2.2

5.2 天然沸石作饲料添加剂对鸡舍氨浓度的影响

沸石粉替代饲料 5% 可以使幼鸡鸡舍氨的浓度降低 21% 左右（表 22），因此，沸石作为饲料添加剂可以明显改善鸡舍的环境条件而产生显著的生态效益。

表 22 沸石对幼鸡鸡舍氨浓度的影响 (单位: mg·L⁻¹)

沸石处理	第一次	第二次	第三次	平均
对照	22	26	28	25.3
3%	19	20	22	20.3
5%	19	20	21	20.0
7%	21	23	23	22.3

参考文献

- 王光火, 莫慧明, 朱祖祥. 1990. 天然沸石作为离子交换肥料的研究. 1: 斜发沸石和丝光沸石的离子交换特性. 浙江农业大学学报, 16 (3): 225 ~ 228
- 史奕, 邹邦基等. 1991. 天然沸石的交换性阳离子类型与农业适用性. 应用生态学报, 2 (4): 312 ~ 315
- 刘远金, 张新明, 李华兴等. 2002a. 天然沸石对鱼塘水及生活污水的氮磷去除效应. 农业环境保护, 21 (4): 331 ~ 333
- 刘远金, 张新明, 李华兴等. 2002b. 沸石对污水中 BOD_5 和 COD_{Cr} 净化效果的研究. 土壤与环境, 11 (3): 323 ~ 324
- 孙家寿, 刘羽, 袁朝晖等. 1996. 天然沸石复合吸附剂的研制与性能. 矿产保护与利用, (1): 23 ~ 26
- 李长洪, 李华兴, 张新明等. 2002. 用 ^{15}N 同位素稀释法研究沸石对氮肥利用率的影响. 核农学报, 16 (4): 237 ~ 241
- 李华兴, 李长洪, 张新明等. 2001a. 天然沸石对土壤保肥性能的影响研究. 应用生态学报, 12 (2): 237 ~ 240
- 李华兴, 李长洪, 张新明等. 2001b. 沸石对土壤养分生物有效性和土壤化学性质的影响研究. 应用生态学报, 12 (5): 743 ~ 745
- 李增新, 张启军. 1997. 天然沸石及其在农业中的应用. 农业环境保护, 1995, 14 (1): 41 ~ 42
- 张继宏, 颜丽, 关连珠等. 1994. 沸石的增产效果及对土壤淋溶水离子的影响. 土壤通报, 25 (3): 123 ~ 125
- 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 1998. 水和废水监测分析方法 [M] (第三版). 北京: 中国环境科学出版社