

· 人工湿地 ·

人工湿地处理污水的研究

王爱萍, 周 琪

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 本文简要地介绍了国内外人工湿地在处理污水方面的研究动态, 概述了 N、P 的去除效率、机理及人工湿地的设计过程, 同时展示了此技术在我国广泛的应用前景, 并提出了该领域的研究方向。

关键词: 人工湿地; 氮磷的去除; 污水

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1001-3644(2005)02-0076-05

Study on Wastewater Treatment by Constructed Wetlands

WANG Ai-ping, ZHOU Qi

(State Key Lab of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The article concisely introduces the study progress of constructed wetlands, summarizes the efficiency and mechanism of nitrogen and phosphorus removal and its design processes. Because of its low cost, easy operation and management, constructed wetlands will be widely used in China. Finally the field to be studied of constructed wetlands is discussed.

Key words: Constructed wetlands; nitrogen and phosphorus removal; wastewater

1 前 言

采用人工湿地净化污水始于 1953 年德国 Max Planck 研究所, 该研究所的 Seidel 博士在研究中发现芦苇能去除大量有机和无机物, 20 世纪 60 年代末, Seidel 与 Kickuth 合作并由 Kickuth 于 1972 年提出根区理论^[1], 80 年代人工湿地系统由试验阶段进入应用阶段, 相继德国、丹麦、奥地利、比利时、荷兰等国家建立了大量的芦苇床系统, 主要用于小城镇的污水处理, 目前该技术在发达国家已被成功地用来处理各类水体, 包括家畜与家禽的粪水^[2,3]、尾矿排出液^[4]、工业污水^[5]、农业废水^[6]、城市暴雨径流或生活污水等^[7]。我国用人工湿地处理污水发展较晚, 直到“七五”期间才有了一定的规模, 但主要还是机理性的研究, 应用上相对迟缓, 应用实例也少, 1990 年深圳的白泥坑人工湿地工程是我国首次实践, 目前人工湿地处理污水技术在我国仍处于起步阶段。

人工湿地是一种由人工建造和监督控制的, 与沼泽地类似的地面, 它充分利用了基质-微生物-植物这个复合生态系统的物理、化学和生物的重重协调作

用来实现对污水的高效净化。目前人工湿地污水处理工艺主要有三种形式, 即表面流工艺 (SFW)、地下潜流工艺 (SSFW) 以及立式流湿地工艺 (VFW)。SFW 系统中, 污水在湿地土壤层表面流动 (一般在 0.1~0.6 米), 氧的来源主要通过水体表面扩散, 此工艺的优点是投资少, 缺点是负荷低, 北方地区冬季表面会结冰, 夏季会滋生蚊蝇, 散发臭味。SSFW 系统中污水在基质的表面下流动, 植物传输给系统氧气, 此工艺的水力负荷大, 对 BOD、COD、SS、重金属等污染指标的去除效果好, 保温性能好, 卫生条件也好; 缺点是投资较 SFW 略多, 控制相对复杂。VFW 系统硝化能力高于 SSFW 系统, 可用于处理氨氮较高的污水, 其缺点是对有机物的处理能力不如 SSFW, 系统的落干/淹水时间较长, 控制也相对复杂, 夏季有孳生蚊蝇的现象。SFW 和 VFW 湿地系统目前应用的不是很多, 较多采用的是潜流人工湿地工艺, 尤其在欧洲、澳大利亚以及南非被广泛应用, 近年来在美国的利用数量也在增加。

人工湿地处理污水具有高效率、低投资、低运转费、低维持费、低能耗等特点。据国外研究资料表明, 在进水浓度较低的情况下, 人工湿地 COD 的去除率达 80% 以上, 氮的去除率可达 60%, 磷的去除率可达 90% 以上, 而城市污水处理厂对氮、磷的去除率往往仅能达到 20%~40%, 但其投资和运行费一般仅为传

收稿日期: 2004-07-20

基金项目: 国家科技部“十五”重大专项(2002AA601023)

作者简介: 王爱萍(1975-), 女, 湖北仙桃人, 现为同济大学环境工程专业 2002 级在读博士研究生, 研究方向为水污染控制工程。

统的二级污水厂的 $1/10 \sim 1/2$ ^[8]。

2 人工湿地中氮、磷的去除效率及机理

2.1 氮的去除效率及机理

湿地中氮主要以有机氮、氨氮、硝氮及亚硝氮四种形式存在^[9]，氮在湿地系统中的循环变化包含了 7 种价态，多种有机氮和氨氮的转化。氮在湿地中的循环转化规律如图 1 示^[10]：

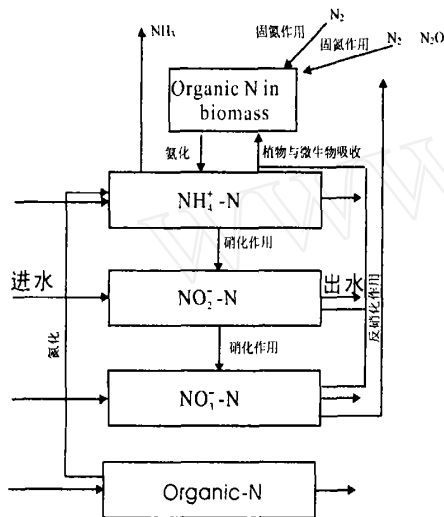


图 1 人工湿地中处理污水过程中氮的循环变化

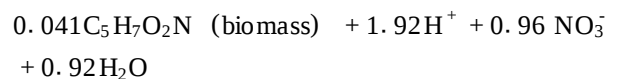
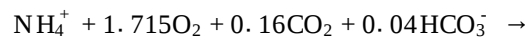
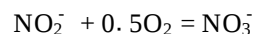
Fig. 1 Nitrogen transformations in constructed wetlands for wastewater treatment

一般情况下，污水的大部分有机氮被微生物降解分解为氨氮，所以人们更关心的是无机氮的去除。人工湿地系统中氮的去除途径包括氨氮的挥发、植物吸收、微生物的硝化 - 反硝化作用、基质吸附。

污水中的无机氮作为植物生长的重要元素可以直接被植物吸收，通过收割而从湿地系统中去除。文献也就植物吸收氮的速率进行了一些报道，Vymazal^[11]研究发现挺水植物和浮游植物氮的年吸收速率范围分别为 $0.010 \sim 0.263 \text{ Kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 和 $0.041 \sim 0.611 \text{ Kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ；Wiltshire^[12]发现芦苇可吸收氮量为 $0.022 \text{ Kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。大多数学者认为微生物的硝化 - 反硝化作用是湿地系统中氮去除的主要途径，植物吸收和氨氮的挥发去除的氮所占的比例还不到总氮的 20 %^[13]。在水中，氨态氮的两种存在形式 (NH_3 和 NH_4^+) 之间的平衡转化主要受温度和 pH 影响，气态氮的挥发仅在 pH 值大于 8 时发生，例如在 25 °C，pH = 7 时，气态氮的质量分数只占 0.6 %^[14]。也有学者持异议，Francisco^[15]等人采用恢复湿地处理农田径流，研究表明，水生植物可积累氮 $0.0073 \sim 0.0365 \text{ Kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，占进水可溶有机氮的 66 % ~

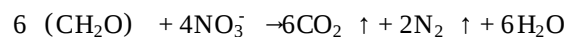
100 %，反硝化速率则很低，最大占进水可溶性无机氮的 24 %，植物的吸收占重要的作用；Sartoris^[16]等人也认为人工湿地系统中氧量较少，硝化作用受限，通过硝化 - 反硝化去除的氮量较少，植物的吸收是除氮的主要方式，因为 Sartoris 研究的原污水中含有较多的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 。目前人工湿地氮的去除机理还存在一些分歧。

微生物的硝化 - 反硝化作用受 pH 值、温度、水体的碱度、碳源、微生物等诸多因素的制约。Green^[17]通过实验表明，溶解氧是限制硝化过程的主要因素。人工湿地氧的来源是通过植物根系对氧的传递和释放、进水中携带的氧及水面更新作用而获得，其中植物通过光合作用产生的氧气是人工湿地系统中氧的主要来源，这部分氧气通过植物的根茎释放到湿地环境中，导致根系周围的氧呈现好氧、缺氧及厌氧区域性分布状态，在此环境中微生物的硝化 - 反硝化作用可以同时进行。目前也可采用人工间歇布水的方式使系统处于淹水/落干交替状态，以保证微生物获得足够的氧气从而使硝化作用顺利进行。硝化作用是在好氧作用下由自养型好氧微生物完成，它包括两个步骤：1. 由亚硝酸菌将氨氮转化为亚硝酸盐 (NO_2^-)；2. 硝酸菌将亚硝酸盐进一步氧化为硝酸盐 (NO_3^-)



硝化反应的适宜温度为 20 ~ 30 °C，低于 15 °C，反应速度迅速下降，5 °C 时反应几乎停止；硝化反应适宜的 pH 值为 7 ~ 8，溶解氧最好维持在 2mg/L 以上。1g 氨态氮 (以 N 计) 完全硝化，需碱度 (以 CaCO_3 计) 7.1g，4.3g 氧气。

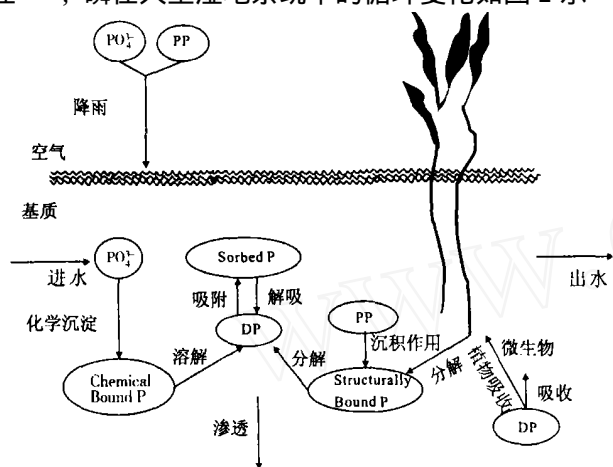
反硝化作用是在无氧条件下，反硝化菌利用硝酸盐中的氧进行呼吸，氧化分解有机物，将硝态氮还原为 N_2 或 N_2O ，并从系统中逸出。



反硝化作用最适宜的温度为 25 ~ 65 °C，pH 值为 6.5 ~ 7.5，反硝化作用顺利进行 C/ $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量比不小于 1，湿地系统中反硝化作用碳源从污水中的有机物或微生物细胞组分中得到。反硝化作用是湿地系统脱氮的唯一持久途径。在处理污水厂二级生化出水或含高的硝氮出水时反硝化作用就显得更加重要，将湿地系统的出水回流可作为强化人工湿地反硝化作用的一种途径。

2.2 磷的去除效率及机理

进入湿地系统中的含磷化合物主要包括有颗粒磷 (particulate phosphorus)、溶解有机磷 (dissolved organic phosphorus) 和无机磷酸盐 (dissolved inorganic phosphorus)。微生物活动使磷主要以正磷酸盐形式存在^[18], 磷在人工湿地系统中的循环变化如图 2 示^[9]:



PP - 颗粒磷, DP - 溶解性磷, PO_4^{3-} - 正磷酸盐

图 2 人工湿地中处理污水过程中磷的循环变化

Fig. 2 Phosphorus transformations in constructed wetlands for wastewater treatment

磷在人工湿地中的去除作用主要有植物吸收、基质吸附沉淀以及微生物的同化。污水中的无机磷一方面在植物的吸收和同化作用下, 被合成 ATP、DNA 和 RNA 等有机成分, 通过对植物的收割而将磷从系统中去。但是植物的吸收只占很少的部分。Cottingham^[19]发现植物收获去除的磷只占 6%, Tanner^[20]认为植物收获基本对磷的去除没有贡献; 缪绅裕等在研究人工污水中的磷在模拟秋茄湿地系统中的分配与循环时发现加入系统中的磷主要存留在土壤中, 留于植物体和凋落叶中的很少^[21]。

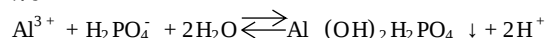
磷的另一去除途径是通过微生物对磷的正常同化吸收、聚磷菌对磷的过量积累, 通过对湿地床的定期更换而将其从系统中去除。由于人工湿地中植物的光合作用及呼吸作用的交替进行, 致使人工湿地交替出现好氧和厌氧条件下的摄磷而利于磷的去除。

一般认为人工湿地系统对磷的去除途径主要是基质的吸附沉淀作用。Reddy^[22]在研究中也发现人工湿地系统中 7%~87% 的磷是通过基质的吸附沉淀作用而被去除的, 其中 pH 值、温度、溶解氧、有机质、磷的进水浓度以及基质的理化性质对磷的去除起着十分重要的作用。

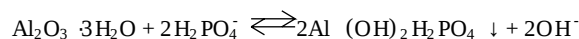
污水中的磷可通过以下以种吸附沉淀的形式而被

去除:

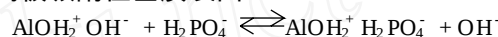
1. 磷与可溶性的铁、铝、镁形成不溶性的磷酸盐而去除



2. 磷与不溶性的铁、铝、镁氧化物形成不溶性的磷酸盐而去除



3. 磷以阴离子的形式可与基质表面的离子发生交换而被吸附在基质表面



Drizo^[23]研究了七种填料对磷的吸附, 发现页岩对磷的吸附能力最强, 其次是铝矾土、石灰石和膨润土, 沸石和油页岩对磷的吸附能力较差。磷的去除率与基质的类型有极大的关系。Zhu^[24]研究基质的理化性质如 Ca、Mg、Fe、Al 的含量与磷的吸附关系时发现 Ca 的含量与磷的吸附相关性最强。Geller^[25]也认为 Ca 与 Fe、Al 的含量相比对磷具有更强的结合能力, 一般基质与 Ca 易于在碱性条件下发生作用, 而与 Fe、Al 主要是在中性或酸性条件下发生作用。同时基质的氧化还原电位也对磷的吸附有很大的影响, 例如在还原环境中, Fe () 将被还原成 Fe (), 从而使与之结合的磷形成的化合物的溶解度升高, 结果导致磷的释放。有机质对磷的去除的影响存地一些分歧, Sakavedan^[26]等人认为有机质不利于磷的吸附沉淀, 原因是有机质与磷竞争吸附点, 相反 Reed^[27]等人认为有机质利于磷的吸附沉淀, 磷能以有机质为载体吸附在基质表面。磷的进水浓度对磷的去除也有一定的影响, 籍国东^[28]等在研究中发现, 当废水中总磷的浓度较低时, 出水中的磷浓度反而增加了, 增加的磷主要来自于湿地介质的释放^[29,30]。尽管植物对磷的去除贡献不大, 但植物的输氧作用能直接影响湿地系统内部的微环境, 促进湿地基质对磷的吸附、沉淀以及蓄积。

大量的观测表明, 人工湿地净化污水的效率是显而易见的。Knight^[31]等对 1300 条湿地的数据分析, 发现湿地对饲养家畜排放水的净水效率, TN 和 TP 达 40% 以上。美国环保机构的数据库显示出更高的处理效率: TN 达 67%, TP 达 76%。但是湿地的脱氮除磷能力受多种环境因子和建造管理措施的影响。尤其是湿地对磷的去除效率在湿地基质吸附交换达到饱和后会明显下降。Tanner^[32]等人对人工湿地基质对磷的积累进行研究, 发现 5 年之后, 基质对磷的吸附能力明显降低。如果以除磷为目的, 则需要收割植物, 定期地从湿地系统中去除沉积物。

3 人工湿地的设计

人工湿地系统的设计涉及水力负荷、有机负荷、湿地床结构、进出水系统及栽种植物的种类等诸多因素。因此在建人工湿地系统之间,必须先确定污水量、污水水质,根据地质、地貌等自然状况设计人工湿地系统。

人工湿地系统前处理一般为化粪池、沉淀池、沉砂池,以去除污水中一部分的 SS, COD 和 BOD₅,以减轻对人工湿地系统的冲击负荷和水力影响。人工湿地系统的坡度美国 EPA^[33] 建议为 0.5%~1%。

填料的选择:人工湿地中的填料在为植物和微生物提供生长介质的同时,还能通过沉淀、过滤和吸附等作用直接去除污染物。进水配水区和出水集水区填料粒径一般在 40~80mm,分布于整个床宽,处理区填料粒径美国 EPA^[33] 建议为 20~30mm,此外填料还应考虑便于取材、经济适用等因素。填料深度一般为 30~70cm。

植物的选择:湿地植物包括挺水植物、沉水植物和浮水植物。植物为微生物提供了良好的根区环境和附着介质。人工湿地中的植物一般选取处理性能好、成活率高、抗污能力强且具有一定美学和经济价值的水生植物,常用的有芦苇、灯心草、香蒲等^[34]。

4 结束语

人工湿地处理污水系统是近年才发展起来的新型污水处理技术,国外人工湿地处理污水已达到一定的规模,我国研究单位已在深圳白泥坑、北京昌平等地进行了有益的尝试。虽然人工湿地的处理方法占地面积较大,但低的投资、运行费用和吨水处理成本,非常适合我国的国情。我国中小城镇众多,人口密集,资金及技术有限,发展大型污水厂有较大的困难,因此人工湿地技术在我国有着广泛的应用前景。但人工湿地并非尽善尽美,还有许多问题有待进一步的研究。

4.1 人工湿地处理污水机理的研究

尽管研究者在人工湿地处理污水机理方面开展了大量的研究,并取得了一定的成果,但因为湿地去污机理复杂,要真正揭示湿地去污机制,还需开展许多研究,如湿地中金属离子、有机物和无机物在系统中的相互作用,植物根际微生物系统的作用,植物根系分泌物的研究以及新型填料的研究开发等。污水净化机理不仅能为湿地技术提供更可靠的科学依据,而且还将丰富化学生态学与污染生态理论。

4.2 人工湿地处理污水系统的建造运行有待进一步的优化

不同的水流类型会对湿地的处理效果产生影响,将表面流型与潜流型、水平流与垂直流相结合,去污

效率无疑会提高。此外湿地面积、形状、水力停留时间等也会影响湿地的去污效率。对这些因素的研究可以为湿地的设计提供一定的理论支持。

参考文献:

- [1] Brix H. Use of constructed wetland on water pollution control: historical development, present status and future perspectives[J]. Water Science and Technology, 1997, 30(8): 209-223.
- [2] Knight R L, et al. Constructed Wetlands for Livestock wastewater management[J]. Ecological Engineering, 2000, 15: 41-55.
- [3] Nguyen L M. Organic matter composition, microbial biomass and microbial activity in gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters[J]. Ecological Engineering, 2000, 16: 199-221.
- [4] Mays P M, Edwards G S. Comparison of heavy metal accumulation in a natural wetland and constructed wetlands receiving acid mine drainage[J]. Ecological Engineering, 2001, 16: 487-500.
- [5] Gillespie Jr. W B, et al. Transfers and transformations of Zinc in constructed wetlands: mitigation of a refinery effluent[J]. Ecological Engineering, 2000, 14: 279-292.
- [6] Sun G, et al. Treatment of agricultural wastewater in a combined tidal flow-downflow reed bed system[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(3): 139-146.
- [7] Thurston K A. Lead and petroleum hydrocarbon changes in an urban wetland receiving stormwater runoff[J]. Ecological Engineering, 1999, 12: 387-399.
- [8] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1995, 16(3): 83-86.
- [9] Kadle, Knight. Treatment Wetlands[M]. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1996.
- [10] Abbas Al-Omari, Manar Fayyad. Treatment of domestic wastewater by subsurface flow constructed wetlands in Jordan[J]. Desalination, 2003, 155: 27-39.
- [11] Vymazal J. Algae and element cycling in wetlands[J]. Boca Raton, Florida: CRC Press/ Lewis Publisher, 1995.
- [12] Wiltshire G H. Productivity of reed beds round a silt-laden dam[P]. Proj. No. NP14/ 106/ 3/ 1/ CSIR, 1981.
- [13] Mars R. The role of the submergent macrophyte *triglochin Huegelii* in domestic greywater treatment[J]. Ecological Engineering, 1999, 12: 57-66.
- [14] EPA(manual). Constructed wetlands treatment of Municipal Wastewaters[Z]. 2000. 52.
- [15] Francisco A Comin, et al. Nitrogen removal and cycling in restored wetlands used as filters of nutrients for agricultural runoff[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 255-261.
- [16] James J Sartoris, Joan S Thullen, Larry B Barber, et al. Investigation of transformations in a southern California constructed wastewater treatment wetland[J]. Ecological Engineering, 2000, 14: 49-65.
- [17] Green M. Enhancing nitrification in vertical flow constructed wetlands utilizing a passive air[J]. Water Research, 1998, 32(12): 3513-3520.
- [18] Cooper P F, Job G D, Green M B, Shutes R B E. Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment[M]. Medmenham Marlow, UK: WRc Publications, 1996.
- [19] Davies T H, P D Cottingham. Phosphorus removal from wastewater in a constructed wetland[M]. Boca Raton, FL: Lewis Publisher,

- 1993, 315-320.
- [20] Tanner C C, Sukias J P S, Upsdell M P. Relationships between loading rates and pollution removal during maturation of gravel-bed constructed wetlands[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27: 448-458.
- [21] 缪绅裕, 陈桂珠, 等. 人工湿地中的磷在模拟秋茄湿地系统中的分配与循环[J]. 生态学报, 1999, (2): 236-241.
- [22] Reddy K R, O'Connor G A, Gale P M. Phosphorus Sorption Capacities of Wetland Soils and Stream Sediments Impacted by Dairy Effluent[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27: 438-447.
- [23] Drizo A, et al. Physical-chemical screening of phosphate removing substrate for use in constructed wetland systems[J]. Wat Res, 1999, 33(7): 3595-3602.
- [24] Zhu T. Phosphate sorption and chemical characteristics of lightweight aggregates(LWA)-Potential filter media in treatment wetlands[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(3): 103-108.
- [25] Geller G. Horizontal subsurface flow systems in the German Speaking countries: Summary of long-term scientific and practical experience; recommendations[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 157-166.
- [26] Sakadevan K, H J Bavor. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1998, 32(2): 393-398.
- [27] Reed S C, D Brown. Subsurface flow wetlands-performance evaluation[J]. Water Environment Research, 1995, 67(2): 244-248.
- [28] 籍国东, 孙铁珩, 李 顺. 人工湿地及其在工业废水处理中的应用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 224-228.
- [29] Ji G-D(籍国东), Sun T-H(孙铁珩), Chang S-J(常士俊). Super heavy oil produced water treatment by surface flow constructed wetland[J]. Environment Science, 2001, 22(4): 95-99.
- [30] Ji G-D(籍国东), Sun T-H(孙铁珩), Chang S-J(常士俊). Studies on subsurface flow wetland treatment system for special thick oil production wastewater from liaohe oilfield[J]. China Environment Science, 2001, 21(1): 85-88.
- [31] Knight R L, et al. Constructed wetlands for livestock wastewater management[J]. Ecological Engineering, 2000, 15: 41-55.
- [32] Tanner CC. Substratum phosphorus accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(3): 147-154.
- [33] EPA (Manual). Constructed wetlands treatment of municipal wastewater[Z]. 1999.
- [34] Bonomo L. Advantages and limitation of duck weed-based wastewater treatment systems[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 239-246.

(上接第 59 页)

其中,“自然”建设不是为城市提供一个装饰性的背景,或者甚至为了改善一下城市环境,而是需要把自然作为城市持久发展的源泉来维持^[5~7]。

3.3 空间结构组团建设

以城市为中心,发展近郊城镇作为城市的卫星城,中心城区划分为若干功能组团,各组团具有各自的发展重点,组团周围及内部精心安排林地、草地、水面等自然组分,使城市零星点缀在绿色背景之中,使广大市民很容易就能感受到自然的温馨。

3.4 绿色产业体系建设

绿色产业体系建设即实现经济环境生态化。经济环境生态化指清洁生产和文明消费,消除工业“三废”污染,提高资源的再生和综合利用水平,做到基本无噪声、无垃圾废物、空气清新、环境卫生,建立发达的生态型产业体系,提高生态产业在国民经济中的比重,使生态型产业在国民经济中占主导地位。绿色产业体系的实质和核心是实现绿色产业的高效化,高效产业的绿色化、生态化^[8~9]。

3.5 社会环境生态化建设

社会环境生态化主要指建立健全生态环境保护的法律法规体系和执法监督机制,采取行政、立法、经济、科技等手段,促使城市生态系统动态平衡,使之向更有序和稳定的方向发展;人口由过快增长向控制人口数量、开发人力资源、提高人口科技文化素质方向转变;使全民形成强烈的生态环境保护风气、自觉的生态意识和

环境价值观;使生活质量、国民健康与社会进步、经济发展相适应。

4 生态城市展望

随着世界人口向城市集聚与城市日益严重的生态危机的矛盾,以及工业化追求的经济效益与提高人居环境质量的矛盾日益加剧,旨在建设高效、健康、平等社会的生态城市必然会成为 21 世纪城市发展的主要方向,并会成为可持续发展人居环境的最终归宿。

参考文献:

- [1] 陈东辉, 苏光路, 张 洁. 浅谈西安城市生态化建设[J]. 山西环境, 2000, 7(1): 7-10.
- [2] 陈 芳. 生态城市与生态环境[J]. 辽宁工程技术大学学报(社会科学版), 2001, 3(2): 22-23.
- [3] 陈 琪, 陈 琪, 周云新. 生态城市、城市规划与建设的目标——论南宁市的生态环境保护与可持续发展[J]. 重庆环境科学, 1999, 21(6): 21-24.
- [4] 陈茂铨, 陈志生, 李升明. 城市化生态问题及对策[J]. 华东森林经济, 2002, 16(2): 48-50.
- [5] 陈 茜. 21 世纪生态城市的文态意向[J]. 武汉城市建设学院学报, 1998, 15(1): 59-61.
- [6] 陈万灵. 生态经济城市的核心是创建生态工业体系[J]. 生态经济, 2001, (10): 41-43.
- [7] 陈 玮. 生态城市规划研究[J]. 规划师论坛, 2002, 18(4): 22-25.
- [8] 陈小卉, 徐逸伦. 关于生态城市规划的研究——以江苏省大丰市为例[J]. 现代城市研究, 2001, (2): 22-25.
- [9] 陈 勇. 城市生态化发展生态城市建设[J]. 华中建筑, 1999, 17(2): 84-85.