

DOI: 10.5846/stxb201401040026

万皓, 林智莉, 吴明红, 张萌, 何欢, 吴成武, 徐宁, 马振. 高校校园生态系统可控性. 生态学报, 2015, 35(21): - .

Wan H, Lin Z L, Wu M H, Zhang M, He H, Wu C W, Xu N, Ma Z. Realization of a Controlled Campus Ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): - .

## 高校校园生态系统可控性

万 皓, 林智莉, 吴明红\*, 张 萌, 何 欢, 吴成武, 徐 宁, 马 振

上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444

**摘要:** 在环境问题日趋严重的背景下, 人类一直在探索将城市生态系统改造成能够自身循环、更好利用可再生能源、同时大幅减少排放的受控系统, 但由于该系统的复杂度太高, 可控程度较低, 其实现难度很大。高校校园可视为比较典型的城市生态系统的子系统, 在合理的管控与现代信息技术的支持下, 高校校园最有可能实现生态系统可控化建设。本文对四个主要生态流(物质流、能量流、人口流、信息流)在高校生态系统中的作用进行理论阐述, 针对具有中国特色、学生大规模集中居住的高校校园, 提出了一种新的受控生态系统改造方案。通过对现有校园生态工程技术进行组装, 完成校园生态系统基础构筑。利用综合的校园生态系统信息流管理平台监管校园物质循环、能量流动、人口流动, 探讨了可实现的高校受控生态系统的建设模式, 最终提出了高校受控生态系统建设的理论模型, 以期达到高校校园物质与能源利用效率最大化, 降低碳排放, 改善局部小型气候群, 进而改善环境大气。本文的探索如能较好的应用到实践中, 将为城市生态系统建设提供重要参考, 意味着现代生态学将为人类发展作出一定的贡献。

**关键词:** 受控校园生态系统; 生态流; 信息流系统

## Realization of a Controlled Campus Ecosystem

WAN Hao, LIN Zhili, WU Minghong\*, ZHANG Meng, HE Huan, WU Chengwu, XU Ning, MA Zhen

School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

**Abstract:** The increasing seriousness of environmental problems is becoming a pressing social issue. Much attention is given to exploring ways to change this situation, with ecology being considered the most effective and sustainable solution. With increasing human development, cities have become the most important form of human settlement. Many studies have examined how to reform cities into managed ecosystems that are more self-contained, achieving a greater utilization of renewable resources and less contamination and emissions. In practice, it is difficult to realize such a system, due to the complex and uncontrollable behavior of city flows. However, college and university campuses may be viewed as representing a simplified eco-city that, through human intervention, is most likely to be reformed into a controlled ecological system through modern information technology and effective management. Thus, the authors investigated the possibility of realizing a controlled campus ecosystem. The study examined the main ecological flows within the ecosystem, which include flows of material, energy, population, and information. The role of the four ecological flows in the metabolism of a campus ecosystem is delineated in this article. At present, a university campus in China typically has many students, faculty, and staff who study, live, and produce there. The campus system has become increasingly energy-intensive and resource-intensive, subsequently discharging increasing quantities of waste to the environment. Therefore, it is necessary to find ways to reduce these outflows, such that the campus system becomes more sustainable. By recycling and reusing waste-water and solid waste, the campus may be transformed into an independent ecosystem. This process raises the possibility of a new approach to reform typical Chinese campuses. Ecological engineering technologies, such as solar energy, green roofs, the use of heat

收稿日期: 2014-01-04; 网络出版日期: 2015-04-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mhwu@staff.shu.edu.cn

pumps, and high-tech information collection systems, etc., were applied to optimize the construction of the campus ecosystem. The Information Flow System (IFS) utilized data on human activities and the flows of energy and matter to more efficiently manage matter circulation and energy flow. This paper presents a theoretical model of how to form a controlled ecological system, and discusses the possibility of realizing the construction and management of an ecologically controlled campus. These efforts are expected to maximize the efficiency of energy and material use; thus, reducing carbon emissions and associated climatic and environmental impacts. If this theoretical model could be realized, it would provide a valuable reference for eco-city construction. Furthermore, this model would make a significant contribution the modern ecology of humans.

**Key Words:** Controlled campus ecosystem, Ecological flow, Information flow system

自 1960 年代以来,人口危机、能源危机、资源危机、环境危机等已引起世人的瞩目,生态学被认为是解决这些危机的科学基础。生态学与人类环境问题的结合是 1970 年代后应用生态学中的最重要领域,新的交叉学科如环境生态学、城市生态学等应运而生。系统生态学,被著名生态学家 E.P.Odum 誉为“生态学中的革命”,更是现代生态学在方法论上的突破。生态模型是系统生态学的核心<sup>[1]</sup>,多变量、非线性的系统分析和数学模型融入生态系统模型中,使生态系统逐步实现可控化。高校作为一种比较典型的城市生态系统的子系统,因其占地面积大,人口集中,带有明显的区域群落生态系统特征,可视为一个多种因素相互作用独立完整的人工生态系统,具有较高的可控性与可操作性。本文将系统生态学理论和高校校园管理实践相结合,认为高校是最佳的人工受控生态系统的实践地。对此系统的进一步拓展,将可以适用于所有可全面或部分管理下的大规模人类生活区,以拓展现代生态学的应用空间,达到改善人类生存环境的目的。

## 1 国内外相关理念与实施现状

Richard Register 的生态城市理论<sup>[2]</sup>运用到高校校园建设<sup>[3]</sup>,主要强调生态可持续性。各国应用环境管理系统(Environmental Management Systems)于校园管理的研究<sup>[4-7]</sup>也不少,主要强调高校生态管理。国际上从 1960 年代的“生态建筑(Arology)”到 1993 年《芝加哥宣言》所倡导的“可持续建筑(Sustainable Construction)”,再经过其后多年的实践、研讨、总结发展到现阶段的“绿色建筑(Green Building)”,进而提出具有可操作性的设计原则、技术措施和评估标准。具有代表性的是美国的《绿色建筑评估体系》(LEED)。

2001 年北美 432 所高校签署 Talloires Declaration 协议,加入高校可持续发展建设。2005 年成立 SEI (Sustainable Endowments Institute),该组织实时记录各大高校生态、节能、可持续发展建设或改建状况,形成 green report card 定期汇报各大高校生态节能改造项目。其中,耶鲁大学(Yale University)、迪金森学院(Dickinson College)、美国明尼苏达大学(University of Minnesota)等实行了校园可持续性改造:构建雨水管理系统;生物锅炉改造,发展生物柴油厂、大型校园地热能;新建或者改造楼宇必须符合 LEED Gold standards 及以上要求;采取节能措施,如能源管理系统、电力计量、节能照明、温控等;从节能教育管理着手,通过可替代燃料校车改造,以及学生教职工乘车优惠激励政策<sup>[8]</sup>。

国内相关理念以生态校园、绿色校园为主,并在我国创建节约型社会背景下提出节约型校园建设,部分高校实践已卓有成效。香港大学、清华大学、同济大学等已在建筑节能、能耗监测、运行管理节能、中水回用系统<sup>[9]</sup>、雨水拦截、餐厨垃圾资源化利用等多个方面做出示范。

我国目前建有各类高校近 2000 多所,学生总数超过 2500 万人,各高校逐渐成为重点能源消耗大户,建设绿色节约型高校势在必行,此外,高校是高新技术的发源地,高校学生是未来社会的精英,为这个群体提供生态服务有利于对未来社会生态可持续环境的友好发展打下思想基础。建设高校受控生态系统成为实现这一目标的必然选择。中国高校整体可控生态系统化建设与国外分散式、开放式校园相较的优势是:中国高校普遍具有半封闭特征,大规模人群集中居住、活动(约 95% 的学生宿居校园),形成“围墙”模式,其内部可控性较

强。高校生态系统的复杂多样性促进可再生能源利用,集中可控性实现了受控生态系统理论物质能源管理模式和技术体系的创新。由国内外的科研与实践可见,高校都是通过局部节能减排措施以达成某一单方面的可持续性发展建设目标,但未进行整体规划和可控化构建,容易顾此失彼。因此,形成整体可控化构建有利于平衡各项目标,Yong Geng 等<sup>[10]</sup>在沈阳大学的实践经验一定程度上填补了这一研究空缺,本文进一步提出受控高校生态系统的整体建设框架。

## 2 高校受控生态系统理论模型

### 2.1 受控校园生态系统

受控生态系统(Controlled Ecosystem)是指受人工控制的规模较大的生态系统,通过对输入以及系统内部结构和功能的管理调控,达到系统最优产出。在人类生活中,由于系统内的结构非常复杂,难以对其进行精确地度量,更难实现理想的管理。高校作为独立完整的人工生态系统,存在大规模聚居人群,生活方式相似,日常活动集中,废弃物产生也较为集中,师生行为的可控性强,使得能源输入与输出的可控性十分显著。因此,构建受控校园生态系统可行性显著,该系统的复杂多样性促进可再生能源利用,集中可控性实现了受控生态系统理论、物质、能源管理模式和技术体系的创新。

校园生态系统的功能是由其中互相联系、互相作用、互相促进的物质流、能量流、人口流、资金流和信息流来完成的,这些流称为生态流<sup>[11]</sup>。本文以校园生态系统理论为指导,以校园生态工程为技术依托,构建受控校园生态系统,具体框架示意如下。

如图 1 所示,通过校园生态工程实现物质流与能量流以及信息流的基础构筑,进而实现对人口流的生态教育与管控。每个生态流之间相互作用、相互依托组合形成高级受控生态系统。随着理论与技术日趋成熟,高校受控生态系统脱离空想,逐步成为可实现的建设模式,下文进行详细论述。

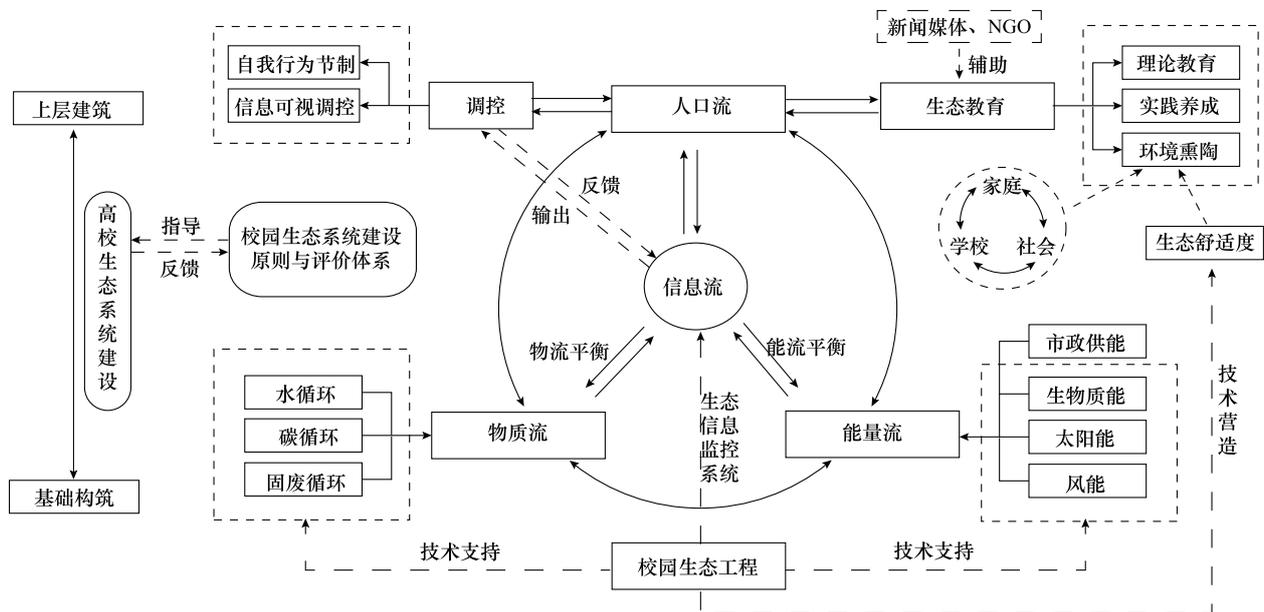


图 1 高校校园受控生态系统建设示意图

Fig. 1 Construction of controlled ecological system of colleges and universities

### 2.2 物质流

I.G. Mason 等提出校园物质循环的“零排放”构想<sup>[12]</sup>，“零排放”是一种理想状态,以高校生态系统作为实践地,构建丰富层次的生态结构,增强其自我更新和抵抗外来干扰的能力,并形成小型生态系统内部自循环,逐步实现“趋零排放”。高校生态系统物质循环主要包括水循环,碳循环,固废循环。

### 2.2.1 校园水循环

校园水循环如图 2 所示,涵盖市政供水系统,中水系统,雨水收集系统三方面。

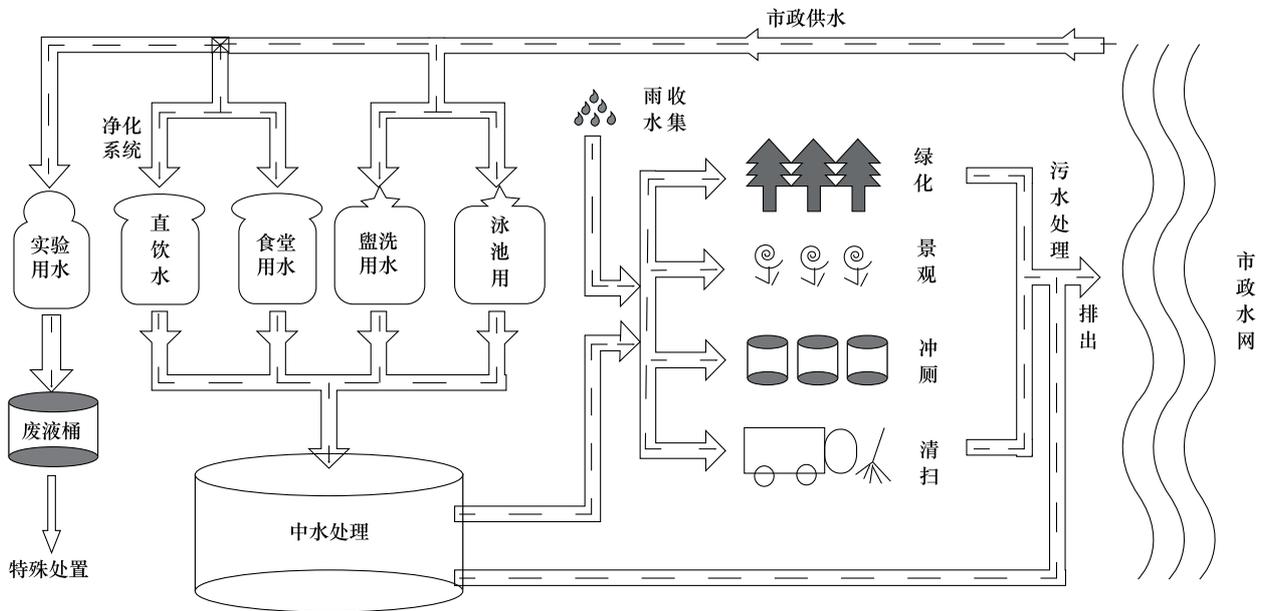


图 2 校园水循环示意图

Fig. 2 Water circulation on campus

市政供水系统主要包括日常盥洗用水、食堂用水;加装过滤系统的直饮水;中高标准用水需求(如澡堂、游泳池、实验室等)。

中水系统,高校建设中水系统有其独特优势。首先高校建筑用水点集中(宿舍区用水量约占学校总用水量的 70%左右),杂排水来源容易,多为优质排水,可生化性强(对实验室特殊污水要另行处置)。其次,在高校中中水管道铺设较容易,成本较低,经过中水系统的回收水也可就地消化,作为校园绿化用水、景观用水、以及冲厕用水。

雨水收集系统,可通过屋顶、道路来收集雨水,而后可相应储存于地下。基本上每一个屋顶都能成为绿色空间,开放空间和校园绿地也是主要集中储存雨水的理想空间,雨水能提供自然通风、植物灌溉的功能。雨量过大时,设施应能将多余的淡水渗透至地下用以补充地下水位。

校园水循环通过信息流建设,对每个用水、排水点进行监控,管制,节流,从而达到水资源最大化利用。将水循环各系统的数据整合到信息流系统中,形成校园生态系统受控水循环。

### 2.2.2 校园碳循环

如图 3 所示,校园生态系统的碳循环较之自然界的碳循环有更多的人工参与度,也相对简单,从外界输入粮食、办公用品等物质,经过人、动植物的共同作用,产生固体废弃物、餐厨垃圾等可利用资源。通过建立合理有效的生物质能转化设施,将餐厨、粪便、植被枯落物等资源化为沼气,甚至是生物燃料,提供锅炉房、汽车等的能量来源,处理后的污泥可作为植物肥料。高校具备教育的基本职能,可发动学生的环保积极性,将所产生的全部垃圾进行分类,其中的可生化处理湿垃圾都纳入沼气转化系统。

有机碳主要以食材的形式进入校园,将后勤物流信息系统升级为定量化核算系统,计算每天进入校园生态系统的含碳物质总量,通过对购入食材的总量与厨房产生的厨余垃圾与泔水的差值得出师生共消耗的物质总量,通过对食材的消耗和转化形式的定量化分析,可以达到对校园碳循环进行合理管控的目的。另一方面,校园绿化系统固定二氧化碳,运用自然生态系统理论,通过对校园绿化面积和种类的分析以及气候条件的分析,定量化得出校园绿化系统对碳循环的贡献。将有机碳的量化信息整合到信息流系统中,形成校园生态系

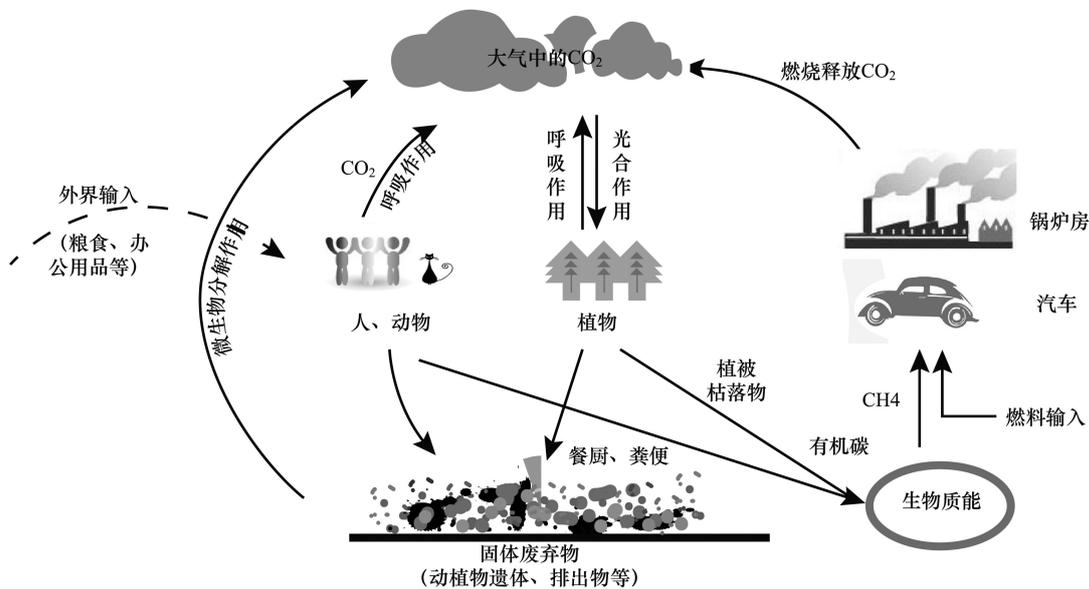


图3 校园碳循环示意图

Fig. 3 Carbon circulation on campus

统受控碳循环。

### 2.2.3 固体废弃物——校园典型耗材的循环

高校耗材具有典型性、集中性、重复性等特征,人流物流具有周期性,倡导、组织学生进行校园垃圾分类工作,实现可回收垃圾的最大化分拣,形成校园垃圾分类系统<sup>[13]</sup>,提高利用效率的同时还可以将垃圾输出量减到最低;其次,以信息流为核心,结合电子商务等技术手段搭建二手物品交易平台,对自行车、书籍、电子产品<sup>[14]</sup>等耗材进行实时回收利用,在高校内部形成自循环<sup>[15]</sup>;建立校园宣传无纸化环境等等,这些举措都可以在降低物质和能源输入、减少废弃物输出的同时不影响甚至改善学生的生活质量,实现低碳环保的校园建设。

## 2.3 能量流

高校生态系统是一个多种因素相互作用的高级生态系统,高校的人居、建筑、景观生态、设备具有极强的交互性,人居的节能行为、建筑的全生命周期能源管理、景观绿化的多样化、设备的节能改造与系统化信息控制、能源设备的环境管理及可再生能源利用之间的细小优化都可对整个高校能源系统产生重要的推动作用。

如图4所示,校园建设及运行供能以市政供能为主,辅以太阳能、风能等可再生能源,餐厨垃圾、生活垃圾、生活污水等生物质能可作为潜在的能源来源,通过技术组装实现能源转化再利用。高校市政供能以水、电、煤、天然气、成品油等为主,通过校园能耗使用平台,对校园内各建筑、锅炉等能量转换设施进行统一管理,分析其用能特性,找出节能空间,并制定技术改造方案措施,以达到用能减量化的目的。

## 2.4 人口流

人口流作为生态流的核心,一方面人对整个生态系统的运行起到至关重要的作用;另一方面,以人为本的思想指导下,建立良好的生态系统最终服务对象是人类本身。提升高校师生对生态系统建设的参与度,形成“3E”(Environment, Education, Economic)良性循环,将有效地促进新型高校受控生态系统的形成。

调控人口流动,缩减能耗。由于高校建筑中的时间和空间利用率与一般公共和商业建筑有很大区别,因此套用一般建筑节能标准和管理方式行不通,必须结合人员流动来对建筑内的用能设施进行有效管理。管控耗能建筑内部人口流动来缩减能耗量,如山东建筑大学等一些高校,建设室内能耗管理系统,通过对人流进出和移动的分析,对教室、办公室内的灯光和空调进行控制。

高校特色生态教育是辅助管控人口流的有效手段。首先,现有的教育生态学表明,学校所具有的规模和组织结构、所提供的物质环境、推崇的价值观念、熔铸的行为模式等等,构成了受教育个体的学习情境,他们对

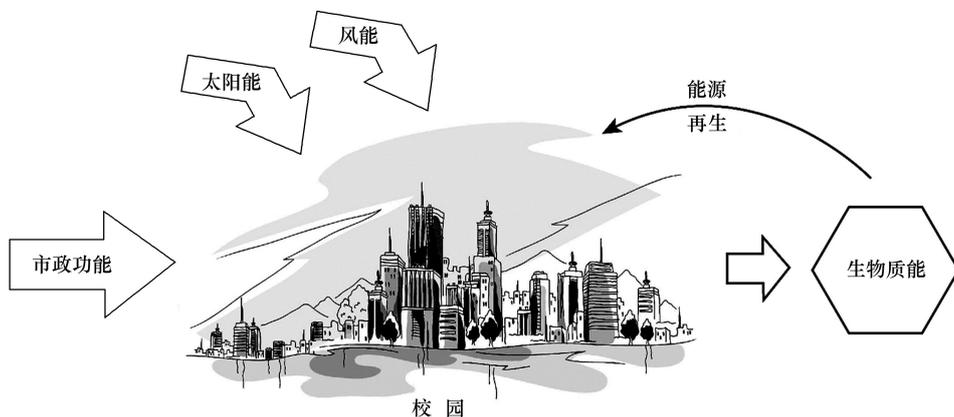


图 4 校园能源流动简图

Fig. 4 Energy flow on campus

受教育者行为造成了明显的影响<sup>[16]</sup>。其次,生态舒适度的提高,让人们感受到生态、节能带来的便捷舒适的同时,能够让人们直接、间接地受到环境熏陶,进而影响人口流动与人口的用能方式。

### 2.5 信息流

2008 年,财政部拨款对清华大学、同济大学等 12 所示范高校建筑节能审计和能耗监测平台建设给予补助,从示范效果看成效显著。据统计,2008 年全国近百所高校人均每年建筑能耗在 37 度/年,而开展示范的高校人均能耗仅有 12 度左右,表明建立高校能源管理体系,在高校开展节约型高校建设活动有广阔的空间。该项目近年来进展较快,现已有几百所高校得到了该项资助。

本文以高校建筑能源利用监测平台的全国推广为契机,提出将其扩展升级为一个综合的校园生态系统信息流管理平台,对全校物质流、能量流、人口流的输入输出进行全过程、全周期监控,从而构建能流平衡图、物流平衡图。同时提出以校园生态工程建设为落实手段,通过新技术应用和多种技术组装,尽可能实现能量高效利用和物质循环的最佳形态。将其作为系统性管理校园生态系统、实现全过程可控化的重要技术基础。

为实现校园生态信息监管系统的最大化利用,该系统通过人口流、物质流、能耗数据采集技术集成,以完成数据原料的收集,如图 5 所示,收集到的数据进行汇总、分析,形成物流平衡图、能流平衡图、以及个人消耗量统计,进而指导人群的行为,具体如下:一、物质流方面,监控校园用水量、用电量以及粮食消耗量、餐厨垃圾量、污水量等可循环资源量,达到可计算,可控,避免浪费的目的。二、能量流方面,能耗监管为能源管理提供科学的数据支持,为能源审计、能源公示提供相应报表,为节能技术改造提供数据参考。三、人口流方面,通过一卡通门禁卡实现校园人口活动的监管,计算个人能耗,物质消耗量,并以此为依据划定节能指标。

### 3 校园生态工程

H.T. Odum 最早提出生态工程并定义为“为了控制生态系统,人类应用来自自然的能源作为辅助能对环境的控制”,“人类利用少量的辅助能对环境进行管理,来控制以自然资源为基础的生态系统”,“管理自然就是生态工程,它是对传统工程的一个补充,是自然生态系统的侧面。”。马世骏将生态工程定义为,应用生态系统中物种共生与物质循环再生原理,结构与功能协调原则,结合系统分析的最优化方法设计的促进分层多级利用物质的生产工艺系统。生态工程的目标是促进自然界良性循环的前提下,充分发挥资源的生产潜力,防治环境污染,达到经济效益与生态效益同步发展。它可以是纵向的层次结构,也可以发展为几个纵向工艺

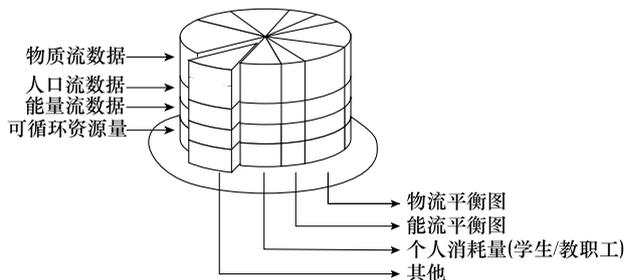


图 5 校园生态信息监管系统示意图

Fig. 5 Ecological information monitoring system on campus

链锁横向联系而成的网状工程系统<sup>[17]</sup>。

生态工程理论融入校园生态系统实践中,即校园生态工程,利用自然能源作为辅能,充分发挥可再生资源的生产潜力,是受控校园生态系统的技术支撑。本文探讨校园生态工程技术集成数据库的建立,以期提供全国范围的校园生态校际技术交流平台。

### 3.1 高校生态建筑

合理的生态建筑可更新能源系统、促进内部物资的循环再生,并与周边建筑或社区的社会、经济功能相辉映。映射气候的建筑规划,充分利用有利气候、太阳能等可再生能源和自然条件,降低不利气候的影响,并能连续调整室内微气候以适应天气的反复无常,清洁低耗,绿色环保。

#### 3.1.1 建筑节能

采用建筑节能技术提高自然能源的利用率,形成大型生态空调设施,具体措施包含:自然通风、自然采光;建筑外墙外窗保温;建筑室外照明:采用风能结合太阳能方式,有效降低对传统电力的需求;太阳能光电系统发电遮阳结合建筑外壁绿化<sup>[18]</sup>,增加阴凉面积,以减少屋顶太阳能辐射。此外,绿色照明也是建筑节能的重要部分,引进更为节能、高效、智能的照明产品,以达到降低能耗、节约能源的目的,打造绿色、环保、低碳、节能的生态模式。

#### 3.1.2 建筑景观生态

根据建筑物特点,建筑景观生态以屋面绿化和墙面绿化为主。高校存在大面积建筑屋面和墙面,利用生物气候学改善建筑能源效率,根据建筑屋顶和墙体的结构特点、荷载以及生态环境条件,选择生长习性与之相适应的植物<sup>[19]</sup>,通过一定技艺<sup>[20]</sup>,在建筑物屋顶、墙面及一切可资利用的空间建造绿色景观。众多科研成果表明屋面绿化有多方面积极作用:夏季降低室内温度<sup>[21-22]</sup>,减少空调等能耗,减少城市“热岛效应”<sup>[23]</sup>;通过屋顶绿化中的土壤层与排水层,储存雨水<sup>[24]</sup>,使城市雨水径流变得缓和,减轻雨水排水管压力;利用植物与土壤联合作用,去除屋面雨水径流中的污染物<sup>[25-26]</sup>,提高雨水资源利用。此外,屋面绿化还可以补偿土地、美化环境、改善校园面貌,为人们提供休闲去处,提升生态舒适度。

### 3.2 可再生能源的利用

太阳能是地球上的主要能源来源,也是洁净、安全、可持续供给、应用最广、最具开发前景的可再生能源。高校建筑特点明显:校园面积大,高层建筑少,容积率小,屋面面积大,如图 6 所示,太阳能照明系统、太阳能热水系统、太阳能采暖系统、太阳能通风系统、太阳能空调系统、太阳能光电系统在高校中有巨大的应用可行性。合理充分地利用太阳能,可以实现校园部分用电自供,建立太阳能路灯系统,实现建筑楼宇太阳能供暖,提供大型空调系统的用电,例如,新型太阳能复合超导冷暖空调,制热时以太阳能和可再生的生物质燃料为主要能源。制冷时借助少量的电能利用地源低温,采用超导能量输送系统直接制冷,达到最合理的节能的制冷效果。此外,利用太阳能和热泵循环系统的结合,通过热泵循环提高其能源品位,克服太阳能热水器阴雨天不能工作的缺点,为校园办公楼宇提供热水。充分利用这些可再生自然资源,为校园供水、供电,达到节能环保,降低能耗和成本的效果。例如,上海大学将其宝山校区的 4 台共 32 蒸吨的燃油锅炉废弃,使用太阳能热水系统为浴室、食堂、宾馆和游泳池提供热水,并辅以空气能热泵和天然气系统,其中的所有环节都通过远程计量系统发送到中心机房进行分析后以自动加人工的方式进行调配。通过一年的精确化运行,已为学校节省 1700 吨标准煤的能源,并且提高了各类用户的满意度,实现了非常好的经济、社会和环境效益。近来,很多学校已在试点建设的分布式光伏发电系统,甚至可以达到兆瓦级别。

校园内的另一类可再生能源是生物质能,如校园的绿化枯落物经干燥压缩后可作为环保型燃料<sup>[27]</sup>。而餐厨垃圾也是一种生物质能的资源,其产生时间、地点集中,便于建设生物质能转化设施,上海大学已经试点建设了日处理量 1 吨的餐厨垃圾沼气发生设备,在无害化处理垃圾的同时每年可获得超过 20 吨标准煤的再生能源。

部分地区的校园内可能有独特的天然可再生能源如风力发电、地热资源等,也可以加以利用。这些再生

能源都可通过信息系统纳入用能集中管理,更进一步,可通过气象信息预测可再生能源产生情况以精确调配对其他能源的投入,达到最大化利用可再生能源、减少二次能源的投入。

### 3.3 校园生态工程技术数据库

探讨校园生态工程技术集成数据库的建设。各高校根据自身实际情况:水文、地貌、资金力度等以及每个校区不同目标,不同需求,从技术集成数据库中选择合适的技术,减少为了低品质的目标使用高品质的产品的现象<sup>[28]</sup>,从而节约成本,避免浪费。

结合信息流系统搭建高校间生态工程技术交流平台,支持各大高校共享技术与建设成果、效益,实时更新,对在建或待建高校起到指导作用,促进大范围高校受控生态系统的建设。

## 4 高校生态系统建设原则与评价体系的建立

国内高校生态工程建设还处于试点高校试运行阶段,将这些成果归纳总结,探讨建立统一的、规范化的生态系统建设原则与评价体系,可有效指导即将开展的各项高校生态、节能、环保项目。首先,建立高校生态系统建设原则,在规划建设阶段予以理论指导;其次,完善评价方法,现有研究将能值法<sup>[29]</sup>、熵权法<sup>[30-31]</sup>、生态足迹<sup>[32]</sup>、碳足迹<sup>[33-34]</sup>、投影寻踪<sup>[35]</sup>、模糊层次综合评价法<sup>[36]</sup>等用于城市与校园生态系统评价,但是目前对各种评价方法应用到高校生态系统中的利弊分析方面还缺乏研究,应完善并规范评价方法形成统一的评价标准;再者,关于评价指标体系的研究已有不少<sup>[37-40]</sup>,都各成一家之言,统一评价指标以及其在整个评价指标体系中的权重分配,形成校园生态系统评价指标体系树状图,有据可查;最后,构建高校校园受控生态系统成果展示平台,记录、汇报各大高校生态、节能、可持续发展建设或改建状况,加强各高校技术交流,完善评价体系,能够有效促进生态系统的理论与技术发展。

## 5 总结

高校受控生态系统的核心是信息流,如图7所示,校园生态系统中各生态流之间相互作用,通过物质流、能量流内循环模式对校园生态系统进行可持续生态化建设,对人口流动的监管,以及生态节能意识教育,促使高校形成高级受控生态系统。

高校校园受控生态系统建设具有较高的可行性,本文作者及其团队正在以某大学为实践地,将本文核心思想——校园受控生态系统,落实到高校校园中。硬件上,正在逐步构建校园水循环、碳循环,在已有的雨水收集系统的基础上,进一步试行中水回用项目、楼层直饮水、生物质能回用;学校的多项大、中型节能造项目、校园生态信息流管理也已开始试运行,与此同时,生态校园宣教工作、学生相关实践活动等也逐步展开。

利用高校受控生态系统模型可诊断、分析高校校园的可改造点,在该系统得到一定数量的高校应用之后,可形成相关高校的大数据库,通过对此类大数据的进一步挖掘分析,可以从中得出更多的信息,以提出更好的节能环保改造方案。

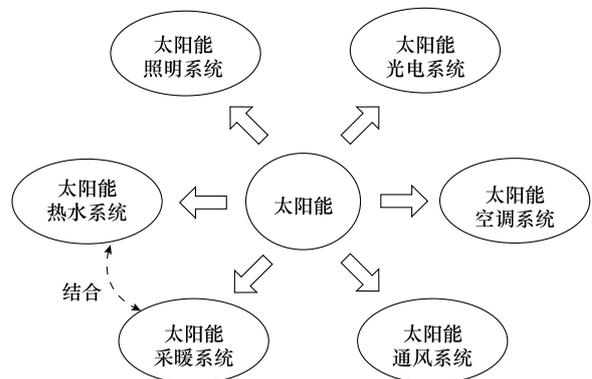


图6 太阳能综合利用系统示意图  
Fig. 6 Solar energy utilization system

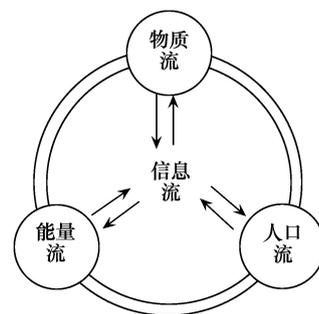


图7 高校受控生态系统生态流模型简图  
Fig. 7 Ecological-flow model in university's controlled ecosystem

而随着未来智慧城市概念的进一步落实,许多今日在高校中可以获取但在城市生活中难以获得的数据信息都将逐步通过技术发展而为人类掌握,我们现在所建设的校园受控生态系统就可能扩展到更多人类聚居的空间,为拓展现代生态学的应用、实现改善城市生态系统的整体功能,为人类提供更加美好的生活环境起到更多贡献。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 沈清基. 城市生态环境:原理、方法与优化. 北京:中国建筑工业出版社, 2011: 7-10.
- [ 2 ] Register R. 生态城市:重建与自然平衡的城市(第二版). 北京:社会科学文献出版社, 2010: 27-84.
- [ 3 ] Finlay J, Massey J. Eco-campus: applying the ecocity model to develop green university and college campuses. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 2012, 13(2): 150-165.
- [ 4 ] Viebahn P. An environmental management model for universities: from environmental guidelines to staff involvement. *Journal of Cleaner Production*, 2002, 10(1): 3-12.
- [ 5 ] Clarke A, Kouri R. Choosing an appropriate university or college environmental management system. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(11): 971-984.
- [ 6 ] Disterheft A, da Sliva Caeiro S S, Ramos M R, de Miranda Azeiteiro U M. Environmental Management Systems (EMS) implementation processes and practices in European higher education institutions- Top-down versus participatory approaches. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 31: 80-90.
- [ 7 ] Alshuwaikhat H M, Abubakar I. An integrated approach to achieving campus sustainability: assessment of the current campus environmental management practices. *Journal of Cleaner Production*, 2008, 16(16): 1777-1785.
- [ 8 ] Sustainable Endowments Institute (2011), College Sustainability Report Card 2011, available at: [www.greenreportcard.org/report-card-2011](http://www.greenreportcard.org/report-card-2011) (accessed 11 February 2011). 请核对此文獻
- [ 9 ] 教育部直属高校中水利用情况. (2010-12-08) [2013-11-04]. <http://wenku.baidu.com/view/e5c452ff04a1b0717fd5dd2c.html>.
- [ 10 ] Geng Y, Liu K B, Xue B, Fujita T. Creating a "green university" in China: a case of Shenyang university. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 61: 13-19.
- [ 11 ] 王祥荣. 城市生态学. 上海:复旦大学出版社, 2011: 150-169.
- [ 12 ] Mason I G, Brooking A K, Oberender A, Harford J M, Horsley P G. Implementation of a zero waste program at a university campus. *Resources, Conservation and Recycling*, 2003, 38(4): 257-269.
- [ 13 ] Mason I G, Oberender A, Brooking A K. Source separation and potential re-use of resource residuals at a university campus. *Resources, Conservation and Recycling*, 2004, 40(2): 155-172.
- [ 14 ] Odhiambo B D. Generation of e-waste in public universities: the need for sound environmental management of obsolete computers in Kenya. *Waste Management*, 2009, 29(10): 2788-2790.
- [ 15 ] De Vega C A, Benítez S O, Barreto M E R. Solid waste characterization and recycling potential for a university campus. *Waste Management*, 2008, 28(S1): S21-S26.
- [ 16 ] 屠佳. 试论高校开展生态文明教育的途径. *中国德育*, 2008, (6): 62-64.
- [ 17 ] 钦佩, 安树青, 颜京松. 生态工程学. 南京:南京大学出版社, 1998: 1-2.
- [ 18 ] 陈宏. 通过建筑外壁绿化改善城市热环境的研究. *新建筑*, 2002, (2): 79-80.
- [ 19 ] MacIvor J S, Lundholm J. Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering*, 2011, 37(3): 407-417.
- [ 20 ] 沈春林, 王玉峰. 种植屋面及其施工技术. *新型建筑材料*, 2010, 37(1): 60-69.
- [ 21 ] Jaffal I, Ouldoukhitine S E, Belarbi R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 2012, 43: 157-164.
- [ 22 ] Parizotto S, Lamberts R. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: a case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. *Energy and Buildings*, 2011, 43(7): 1712-1722.
- [ 23 ] 许道坤, 吕伟娅, 张军. 屋顶绿化在隔热降温、蓄水减排和净化屋面径流污染中的作用. *安徽农业科学*, 2012, 40(3): 1604-1644.
- [ 24 ] Schroll E, Lambrinos J, Righetti T, Sandrock D. The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate. *Ecological Engineering*, 2011, 37(4): 595-600.
- [ 25 ] Berndtsson J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 351-360.

- [26] 周赛军, 任伯帆, 邓仁健. 蓄水绿化屋面对雨水径流中污染物的去除效果. 中国给水排水, 2010, 26(5): 38-41.
- [27] Elbeshbishy E, Nakhla G, Hafez H. Biochemical methane potential (BMP) of food waste and primary sludge; influence of inoculum pre-incubation and inoculum source. *Bioresource Technology*, 2012, 110: 18-25.
- [28] Odum H T, Odum E P. 繁荣地走向衰退: 人类在能源危机笼罩下的行为选择. 北京: 中信出版社, 2002: 91-92.
- [29] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 张妍, 张力小. 基于能值分析的城市生态系统健康评价——以包头市为例. 生态学报, 2008, 28(4): 1720-1728.
- [30] 王兰英, 商秀印, 邱玉桥. 熵权法在农村生态校园经济效益评价中的应用. 河北大学学报: 自然科学版, 2010, 30(4): 356-360.
- [31] 周文华, 王如松. 基于熵权的北京城市生态系统健康模糊综合评价. 生态学报, 2005, 25(12): 3244-3251.
- [32] 顾晓薇, 李广军, 王青, 刘建兴, 丁一, 刘敬智. 高等教育的生态效率——大学校园生态足迹. 冰川冻土, 2005, 27(3): 418-425.
- [33] Larsen H N, Pettersen J, Solli C, Hertwich E G. Investigating the carbon footprint of a university- the case of NTNU. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 48: 39-47.
- [34] Ozawa-Meida L, Brockway P, Letten K, Davies J, Fleming P. Measuring carbon performance in a UK university through a consumption-based carbon footprint: De Montfort University case study. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 56: 185-198.
- [35] 陈广洲, 汪家权. 基于投影寻踪的城市生态系统健康评价. 生态学报, 2009, 29(9): 4918-4923.
- [36] 姜新佩, 庞力, 郑保. 基于模糊层次综合评价法的高等学校生态校园评价. 数学的实践与认识, 2012, 42(1): 41-51.
- [37] 吴琼, 王如松, 李宏卿, 徐晓波. 生态城市指标体系与评价方法. 生态学报, 2005, 25(8): 2090-2095.
- [38] 郁亚娟, 郭怀成, 刘永, 姜玉梅, 李艳秋, 黄凯. 城市病诊断与城市生态系统健康评价. 生态学报, 2008, 28(4): 1736-1747.
- [39] 窦建奇, 王扬. 基于 AHP 法的大学集约化设计评价指标分析. 武汉理工大学学报, 2009, 31(24): 152-156.
- [40] 崔萌, 张宏伟, 王媛, 雷鸣, 钟定胜. 基于层次分析法的生态校园评价体系. 天津工业大学学报, 2007, 26(4): 81-85.