

The Strategic Planning of Sustainable Utilization of Water Resources by Constructing Artificial Wetland Achieves

Yu-Kang Yuan¹, Chih-Min Huang², Meng-Ru Wu², Jingqing Gao³

¹Graduate School of Materials Science, National Yulin University of Science and Technology, Taiwan

²Graduate School of Engineering Science and Technology, National Yulin University of Science and Technology, Taiwan

³Research Institute of Environmental Sciences, College of Chemistry and Molecular Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou

Email: yuanyk@yuntech.edu.tw

Received: September 2014

Abstract

Water Resources Management has assumed greater significance in Taiwan and China as a result of the impact of global climate change. However, from policies to actual operation models and systems, several problems are identifiable. Hence, under current water resources management interventions, it has been difficult to deal with drought disasters. It is a generally accepted fact that water storage and wastewater regeneration are the only ways of seeking new sources of supply when there is a water shortage, and water shortage has become an even more pressing concern because of urbanization. In the 21st century urbanization has still shown no signs of slowing down and further population migration to cities or the rampant development of a city-style life has led to an even greater consumption of water resources and an elevated increase in the output of waste water. It is within this context of a high water shortage that ecological engineering methods become very important. Ecological engineering allows for the realization of local resources, reduces carbon footprints, and increases habitat space. Using ecological engineering, an artificial wetland treatment system can be built that allows for waste water regeneration and the use of reclaimed water while decrease the environmental impact and cost. If ecological engineering programs also take into account regional characteristics and needs and if ecological tourism and environmental education are also included in the overall plan, sustainable utilization of water resources will be greatly enhanced.

Keywords

Artificial Wetland, Sustainable Utilization, Water Resource Regeneration, Ecological Engineering

以人工湿地为基础建构水资源可持续利用系统之战略规划

袁又罡¹, 黄智敏², 吴孟儒², 高镜清³

¹国立云林科技大学材料科技研究所, 云林县斗六市, 台湾

²国立云林科技大学工程研究所, 云林县斗六市, 台湾

³郑州大学化学与分子工程系环境科学院, 郑州

Email: yuanyk@yuntech.edu.tw

收稿日期: 2014年9月

摘要

随着全球气候变迁的影响日益显著, 不论台湾还是中国, 在水资源管理上, 从政策到制度都有许多不足之处, 因此, 使得原本就处于极易出现干旱灾害的环境, 更加的不稳定。水资源不足已是大家公认的事实, 在降雨开源不可期待的情况下, 只有从储水与废水再生等途径寻求新的供应源。自迈入21世纪以后, 人口迁徙已成常态, 都市化成为趋势, 水资源的消耗更是大增, 废水的产量也有增无减。所以, 采用生态工法, 实现就地取材, 减少碳足迹, 同时增加生物栖息的空间, 依此建构人工湿地土地处理系统, 在低成本、环境冲击小的考虑下, 完成污水再生, 并将再生水用于浇灌、地下水补注及冲厕杂用等, 如能因应地区特性与需要, 把生态旅游与环境教育纳入规划, 则水资源可持续利用的意义将更加完备。

关键词

人工湿地, 可持续利用, 水资源再生, 生态工程

1. 引言

中国文明起源自黄河流域, 古埃及文明依托于尼罗河, 古印度文明则依傍恒河而生, 探究其原因, 人类必须有水才能生存。由于水是人类生存发展不可或缺的重要资源, 自古以来, 越是人口密集的地区, 对于水资源的管理与运用, 付出的心力与智慧就越多。秦昭王(公元前 251 年)命蜀郡守李冰主持修建了岷江上游的大型引水枢纽工程——都江堰, 成为现存世界上历史最久的无坝引水工程; 古罗马时期, 为了满足罗马城的百万人口需要, 陆续设计建造了 11 条规模不等的引水道, 从周边地区引水提供给罗马城居民, 现存的嘉德水道桥(Pont du Gard, 约兴建于公元 50 年)已成重要的文化遗产。

公元元年, 世界人口约 2.92 亿; 大约在公元 1804 年时, 全世界人口数突破 10 亿; 公元 2010 年, 世界人口约达 69.32 亿[1] [2]。由于人口增加的速度愈来愈快, 水资源的需求自然会愈来愈多。依据联合国报告指出, 全世界有 26 亿人没有足够安全卫生的水可用, 再加上许多地区的污水未经适当处理, 随意排放的结果, 导致饮用水的污染, 使安全水资源的供应受到巨大威胁[3]。因此, 联合国与一些国际组织以“水危机”来泛指“自 1970 年代以后, 世界水资源的供应相对于人类需求的状况”[4]。而造成危机的主要因素有二, 一为可用水资源的匮乏, 二为水体的污染。

当世界各国在面临因人口增加而产生巨大供水压力的难题时, “气候变迁”(Climate change)使此一

问题更是雪上加霜。顾名思义，气候变迁指的就是气候特性的变化，如今已有越来越多的证据显示，由于人类的各种活动强化了温室效应，结果导致地球环境的特性出现显著改变，其中又以全球平均气温的升高与降雨型态的改变等现象最为显著。以台湾为例，台湾各地长期的年平均降雨量，并不像气温般有明显的增减趋势，然而在降雨时数方面，则各地均呈现减少现象。另外，根据台湾中研院环境变迁研究中心(Research Center for Environmental Changes, Academia Sinica)研究显示，每当全球气温增加 1℃，全球前 10%强降雨会增加约 110%，而小、中强度降雨则会减少约 20%；在 1961 年至 2005 年间，全球气温约增加 0.7℃，全台湾前 10%强降雨在此 45 年间则增加约 100% [5]。

面对气温日益增高，而降雨稳定性大幅改变的影响，无论是在水资源管理，甚至是河川流域之治理面上，既有的措施或是方法都可能遭遇极大的挑战。如何满足民生、农业灌溉及产业用水的需求，且能同时兼顾永续性、多样性、前瞻性与可行性，并涵盖治水、利水、保水、亲水及活水之水资源规划，人工湿地净水的开源式构想乃因此具有进一步探讨的必要。

2. 开源的另一种思维

依据联合国提出的“水危机”概念，形成危机的第一项原因，在人力不可回天的情况下，短期内没有理想的改善方式；而第二项危机形成的原因，只要有适当的方法，短期内即可见效。以台湾地区为例，2011 年的生活用水量为 31.8586 亿立方公尺，而自来水供(配)生活用水为 30.2272 亿立方公尺，占生活总用水量之 94.88% [6]。以年平均降雨量 2500 公厘估算，台湾每年可生产水量约为 900 亿立方公尺，平均约有 670 亿立方公尺的水量从河川流出，其中约 100 亿立方公尺以上的水量可直接自河川引用作为灌溉或民生用水，另由水库调节供应约 36 亿立方公尺，由地下水平衡抽用约 40 亿立方公尺，因此，在目前每年可获得平均的供水量约 176 亿~180 亿立方公尺左右的水量。

由于各类别的用水量随着经济不断增长的结果，皆会出现一定成长。根据经济部“台湾地区水资源开发纲领计划”(1999)估计，2001 年及 2011 年全年生活用水量，从 2001 年之 28.37 亿吨至 2011 年之 35.40 亿吨，成长约 25%；而工业用水成长幅度更大，由 2001 年之 8.37 亿吨至 2011 年之 19.72 亿吨，成长了接近 135%，平均年成长率接近 4.4% [7]。而 2007 年的数据也显示，台湾重要的 50 条河川当中，受到轻、中度污染的河段约占 34%，而受到严重污染的河段，约占 6% [8]。但政府在未来的水资源对策及展望方面，估计值与实际值差异明显，而且只着重在水库集水区的保育治理与设施更新、加强区域水资源调配等方面，对于工业废水与生活污水、农业灌溉排水的再生与再利用，并未给予足够的重视。

在各种天然条件限制及环境保育政策考量下，台湾地区的传统水资源已不易开发，经济部水利署因此寻求“新兴水源”作为辅助性水源，以供应水利法规定之第三顺位“工业用水”（主要为新开发案）；其中，“废污水回收再利用”即为新兴水源之一环(参考表 1) [9]。

依据现行法规要求，不论是哪一类型的放流水，皆须符合放流水排放标准(Effluent standards)，由于不是“基准”(Criteria)，所以一些微量污染物在日积月累之后，仍会对河川及海洋生态造成难以回复的

Table 1. Water use classification

表 1. 新兴水源利用分类

	一	二	三	四	五
	都市污水	工业废水	农业水源	海水	雨水
回收 (取用模式)	建筑物内中水回收	事业制程节水 (工业节水)	农田回归水利用	-	-
再生 (取供模式)	都市污水处理厂 放流水再生	工业区废水处理厂 放流水再生	农业灌区末端排水(灌区尾水) 回收	海水淡化	雨水储留处理

冲击(Impacts)。同时，来自河川的可用水源也会因此而减少。

现代化物化方式的污水处理方法原本就是一项高成本的工艺，以现行已推动之生活污水再生利用计划，初估再生水成本约 20 元/立方公尺，而台湾地区的平均水价约为 10.8 元/立方公尺(2013 年)[8]。由于自来水的生产成本只有再生水的二分之一左右，因此推广不易。而以生态工程(Ecological engineering)方法构筑的人工湿地土地处理系统(Land treatment system)，以云林科技大学校园内的实验场址为例，每立方公尺的污水处理成本约为 12 元以下，如果将其回收作为消防用水、植物浇灌用水、中水(Dual water)等，由于处理成效可以符合管理标准(参考表 2) [10]，因此可以取代部分自来水的生产，在扣除自来水的生产成本之后，每立方公尺的实际使用成本不到 2 元[11]。而且兴建材料乃就地取材，完全符合现代碳足迹(Carbon footprint)的要求。

台湾地区 80%的人口聚居在各大小型都市，其生活活动所排出的污水较为集中，排入河川等水体是造成河川及水库污染的主要原因。台湾的水污染源中，工业废水及畜牧废水，在政府长期的管制及倡导下，所排放之总污染负荷 BOD 约为生活污水之三分之一(参考表 3)，已获得相当的控制和成效，惟独污水下水道建设，虽近年来政府已开始重视，但其建设成效，除了台北市之普及率已达 72.14%(以接管人口比率计算)外，高雄市及新北市则约在 30%左右，至于其它地区之都市则仍低于 10% [12]。世界各国人口朝都市流动已是趋势，每日的污水量在可预见的未来将不断上升，在缺乏完善管理及保护用水水体水质之水质标准、或过于宽松的情况下，符合自然生态与人类用水安全需求的水源日益减少。日本为保护海湾水质，订有依水体允许之“总量”核算不同排放源更加严格之放流水水质标准，如在东京湾、伊势湾与霞浦湾等三个海湾，为使海湾水质能确实达标，因而订定有目标年，设定“允许排入海湾之总量”以为削减各污染源的策略，藉此规范及制定排入海湾范围内之放流水质及策略。

Table 2. Removal efficiency of land treatment system estimated value (%)
表 2. 土地处理系统的去除效率估计值(%)

成分	灌溉	渗滤	漫流
BOD	>98	85~89	>95
COD	>80	>50	>80
悬浮物	>98	>98	>92
总氮	>85	0~50	70~90
总磷	80~99	60~65	40~80
金属	>95	50~95	>50
微生物	>98	>98	>98
总溶解固体	0~30	0~10	0~30

Table 3. Various sources of wastewater volume (2011)
表 3. 各种污染源废污水量(2011 年)

来源别	产生量	削减量	排放量	产生量	排放量
	(BOD5 公吨/日)	(BOD5 公吨/日)	(BOD5 公吨/日)	百分比(%)	百分比(%)
总计	2447	1731	717	100.0	100
市镇污水	999	601	499	40.8	69.6
工业废水	799	655	145	32.7	20.2
农业废水	649	576	73	26.5	10.2

在都市及其它各类污水已有处理的前提管理政策要求下，在放流水排放口下游利用生态工法(Ecological engineering method)兴建人工湿地土地处理系统，进一步处理放流水(二次处理)，使达到维护自然生态系统及增加可用水资源之双重目的，应属可行的开源战略。

3. 生态工程的发展与人工湿地的功能

依据科学概念所发展出的湿地定义，目前在全世界各地至少有数十种，但就一般共识性的说法，湿地是一种介于陆域与水域系统之间的渐变低地，被经常性浅层或间歇性出现之水体所覆盖，其中构成的土壤多数呈现水分饱和状态。

1971年在伊朗的拉姆萨签属的《拉姆萨公约》(Ramsar Convention)，订定之湿地分类系统，将人工湿地分为九种，包括池塘、灌溉土地、低洼地、废水处理区、运河与灌溉及水沟等。因此，人工湿地必须具备：1) 水饱和、或浅水覆盖；2) 耐湿性植物、或水生植物；3) 土壤(含微生物) [13]。

在人工湿地的构建过程中，人为添加的各种辅助性设施，可以改变湿地生态系统的结构，包括生物群落(Bio-community)组成和无机环境，藉由生态系统本身的自我组织能力、自我维护(净化)能力、自我更新能力，建构出一个较为稳定的湿地生态系统。如果设计合理，此系统运作之后即可表现出符合设计者规划时目标的成果，而这也是生态工程概念发展的具体目地。

廿世纪初，由于工业的快速发展，欧洲地区随着经济的骤然腾飞，各种物质与环境资源的需求激增，导致森林荒野的过度开发，于是大规模的灾害不断发生，包括洪泛、土石流等，因此，如何因应环境的变迁乃成为相关国家的重大课题。1938年德国的赛佛特(Seifert)首先提出近自然河溪整治(属于“近自然水利工程”，near-natural-hydraulic engineering)的概念，这是最早的生态工程概念。

而第一个对“生态工程”提出清楚定义的是奥德姆[14]，他的定义为：“在人类所操纵(manipulate)的环境中，利用一小部分额外的能量来控制一个以自然能量为基础的系统，生态工程所应用的规则虽以自然生态为出发点，但之后所衍生出的新系统将有别于原系统”。在1989年由米区(W.J. Mitsch)与乔根森(S.E. Jørgensen) [15]汇整各家意见后，清楚界定了生态工程应用应具备的本质与内涵，包括：自我设计(self-design)、生态系统保育(ecosystem conservation)、以太阳能为基础(solar basis)、是大自然不可分割的一部分(a part of, not apart from nature) [16]。

因此，根据以上原则，在进行工程规划时，若决定采用生态工法的概念，则必须有以下各项考虑：1) 安全考虑；2) 构造物之于周遭生物栖地应有的考虑；3) 施工过程中降低生态冲击的考虑；4) 后续生态环境管理应有的考虑[17]。依据日本发展的经验，善用植物所能提供的机能、有效增加生态环境的多样性(Diversity)，带状缓冲区的布设、用心营造生物所需的栖地(Habitats)条件。

过去，在台湾的工程建设一直强调坚固耐用与一劳永逸，于是钢筋水泥成了大家的最爱，从村里小镇的排水沟、灌溉圳道，到山区的边坡护壁、排水渠道等，莫不如是。同时，为了节省人力与时间，也为了施工方便，因而必须大量仰赖机械化，或是采用价廉、一体适用的模具，于是构筑出来的成品几乎都是一个模样；一般常见的海堤、河堤，以及河岸与海岸边的消波块(Armor blocks)，也都是如此。这些大而无当或是景观单调的钢筋混凝土产物，不仅破坏了大自然原有的细致与分层，同时也戕害了生物的栖息[18]，而最重要的是它们也常常是灾害发生时的受害者。一旦这些构造物遭到破坏，留下的废弃物要如何处理，又是一个难以解决的问题。

基于水体污染物的降解、生态环境的保护及兴筑成本低廉等考虑，以生态工法建构的人工湿地是目前被广泛接受的一种选择。这类型的人工湿地常用于处理生活污水、雨水径流、小型工矿企业的放流废水、农田排水等。虽然自然湿地也具有极高的污染物降解功能，但是，经过精密设计和科学管理的人工湿地，不仅具有可控制的空间范围，并且在功能的发挥上更加稳定，可以有效发挥保护地下水与周边自

然环境的效能,确保污水在流经人工湿地后已经完全满足直接排放到自然水体或湿地中的“水质”要求。

人工湿地中,水位高低、沉积物类型、植物种类与流量等都可以被调控,若要避免污染物的扩散,在设计时即可纳入无渗透功能的隔离装置与周围的自然环境隔开,以防止突然变化的污水负荷对自然环境的影响。在人工湿地当中,扮演除污功能的主要角色有二,一为植物,二为微生物。

植物的作用,包括:吸收水体中的营养物质并转化为可被去除的生物量形式(藉由“收割”方式)、形成根区系统为微生物提供生存空间(创造极大的界面)、根系覆盖区可因氧气多寡形成复杂的好氧与厌氧区域等[19]。在污水净化过程中,许多有机物或离子可被植物吸收,而植物的根系因可创造出最大的接触表面积,提升了植物的吸收效率,而与微生物合作的结果,不论是易分解或难分解性的物质,都可以在根系区的好氧与厌氧区域获得有效处理。

研究显示,由土壤、砂及卵石构成的基质,存在其中的微生物种群才是污水净化过程中的关键,透过微生物的酶系统进行各种生物化学作用,使污染物的结构与型态获得转变,因此植物的吸收与利用才更容易,可充分扮演好生态系统中的分解者角色。李科德等[20]研究芦苇床净化污水的时候,发现在根表面周围的根际土之细菌量可达 10^8 个/克(干重),且一旦趋向稳定,则不易受到季节的影响,这是单一植物相的结果。但根据袁又罡等人[21][22]的研究则有不同的结论,如果放任植物自然演替,则随着季节的变化,植物优势族群会有更替现象,同时,植物根际土壤中的细菌群组成也会发生改变。可见,微生物的组成与植物之间,实有密不可分的关系,两者间共生特性明显。

4. 人工湿地土地处理系统的结构与应用

结合生态工法的人工湿地土地处理系统,其具体结构可以分成以下几个部分:

1) 曝气阶梯:利用地形高度差,以现地或附近原有之大小石头堆砌成简单之阻水断面,使水流在经过的时候可以与空气混合,增加水体中溶氧的浓度,以作为后续生物除污时效率提升的基础。

2) 氧化塘(oxidation pond):又名稳定塘(stabilization pond),这是一种比较古老的污水处理技术,具有能够充分利用地形、实现污水资源化及能量损耗少等显著的优点。在其中生长着种类繁多的各种生物,包括有细菌、真菌、藻类、原生动物和后生动物、水生植物与其他水生动物等,藉由藻类的光合作用,提供了水体中其他生物所需的氧气,使生物可以进行各项净化污水的作用,其去除机制包括稀释作用、沉淀和絮凝作用、好氧微生物的代谢作用、厌氧微生物的代谢作用、浮游生物的作用和水生维管束植物的作用等等[23]。

3) 储水池:流经氧化塘的污水继续流入一个简单的储水设施,以便作为下一阶段之使用,由于水流至该处时会暂时形成流速减缓的现象,具有沉淀池的作用。

4) 漫灌区(Flood irrigation area):目前已发展出的类型依污水处理方式大约可以分成四种——①慢速灌溉:又称慢速渗滤,即用污水灌溉农田、草场和林地,以之提供植物生长需要;②快速渗率:把污水导入土层使之净化,相当于把土层模拟成柱状层析的载体;③坡面径流:使污水在长有植物的缓坡漫流而下,一部分渗入土壤中,少量蒸发掉,其余的最后流入集水沟内;④湿地系统:本法介于土地处理与水生生物处理之间的设计,其构造可简述为——在一定长宽比及底面坡降的洼地或是浅水池中,按一定的坡度填充一定规格的填料(如砾石),在填料表层土壤中种植一些处理性能良好、成活率高、生长周期长且美观,同时,亦具有经济价值的植物(如芦苇),以构成一个湿地生态系统[24]。传统的人工湿地设计,几乎都是以人为方式选定适合的植物种类;且在使用过程中,以人为维护方式保持植物种类的纯粹[17]。

5) 处理水储存池:流出漫灌区的处理水,经渠道导向储水设施,一方面减缓流速使悬浮微粒沉降,另一方面预作下一阶段应用的准备。

以上结构可以因应地形、环境特性与实务上的需要,而作适度的调整、或改变。而以生态工法建构

的土地处理系统之漫灌区，基本的操作策略是以生态系统的自然演替(Succession)为依归，由自然自己拣选出最适合的生物种类(此观点与米区等人“自我设计”的概念相符)，能如此，一方面可以完全发挥自然的自净作用，而另一方面可以减少管理的成本支出。依照过去的经验显示，此类系统的最大缺点在于需要较长的时间来进行演替，而这是一般生物治理方法所共有的相同问题，如要解决该项问题则基础的研究必不可少，例如演替过程的植物相变化、植物根系微生物相的变化、以及水质与植物和微生物间的关系等，依此结果，则新建的系统即可据此直接种植适当的植物和接种适当的微生物作为开始，使演替时间缩至最短。

目前，采用人工湿地土地处理系统所进行的各类应用有：袁又罡等[25]“土地处理系统中土壤微生物处理锰之研究”、袁又罡与连万福[26]“除草剂嘉磷塞对漫灌区中优势植物及土壤中铁、锌释出之影响研究”、袁又罡与黄妙如[27]“收割植物对漫灌区水质净化效能之影响研究”、Yuan 等人[28][29]“以植物演替为指针探讨土地处理系统漫灌区的水净化效能”及“以微生物群落为指针探讨土地处理系统漫灌区的水净化效能”、汪文龙(W.L. Wang)等人[30]“以两阶段调节表面流人工湿地处理污染河水之效能与影响”、高镜清(J. Q. Gao)等人[31]“表面垂直流人工湿地上种植之西伯利亚鸢尾草在冬天的生长特性和营养盐去除能力”。从这些相关的应用与研究当中不难发现，此系统具备的功能相当广泛，对于生活污水、农业灌溉水当中的有机物、重金属与农药等皆有一定的去除作用，而且可以建立一套有效且价廉的管理方式。

5. 两岸水资源可持续发展之未来展望与战略规划

水资源为全人类求生存所不可或缺，同时也是产业生产、经济发展与社会安定之关键。随着人口不断快速增加，全球气候变迁的冲击，再加上传统水资源的开发往往会因为冲击环境而引起群众抗争，水资源难以可持续发展似乎已成人类未来可能灭绝的重要原因之一。

台湾一直以来就是水资源贫乏的地区，目前是世界排名第 18 位的缺水国。特别是自从 921 地震(1999)以后，原本就结构脆弱且地质破碎的集水区，每遇豪雨就会造成严重的土壤冲刷，导致森林倾覆流失，于是裸露地增加、水源涵养能力消失，下游水库淤积及地表径流水浊度大增，可用水资源更加减少。另外，因为全球气候变迁所带来的强降雨集中现象，使问题更是严重。

针对台湾的现状，解决问题的可行思考方向，必须跳出过去的思维窠臼，从源头治理、跨域协调、多元联合运用、流域整合、公民参与原则，透过预防性、降低风险性与避险性方向思考，以分布式小系统支持大系统方式建构调适策略[32]。以多元化水源开发为例，在传统水源开发的代价愈趋困难的情况下，推动新兴水源作为辅助水源已被政府当局列为多元化水源目标之一。新兴水源与传统水源均为水源，只是新兴水源需要经过处理，与传统水源仅需拦蓄、简单处理即可运用，较为不同。现阶段主要包括海淡水与再生水。

而负责水资源政策制定的经济部水利署，主要的着眼点为：“都市污水处理厂目前处理水量每日约 285 万吨，因水量稳定，有再生成本较低之优势，国外已有许多成功案例，考虑管线经济效益，宜优先供给工业使用，是现阶段推动再生水主要标的，若能择定适当地点与再生程序，妥善作为一种备用水源，则可提高区域供水稳定性与余裕量，降低各区域缺水之风险，并可作为各类环境保育、生活杂用与工业补充用水”[7]。由于政策并未与当前自来水水价进行直接比对，因而忽略了价格障碍，而且许多工厂是以直接抽取更低成本的地下水方式运作，使政策推广层面难以扩展。如果以现行经处理后之放流水，在放流后再以人工湿地土地处理系统进行二次处理，则水质进一步提升后可以直接回收应用于：地下水补注、景观用水、绿地浇灌、冲厕杂用等。

由于直接在现行污水处理厂内建构再生水设施，不论是从土地需求上、成本上，在地狭人稠的台湾

实为不易克服的困难。未来，可以在污水处理厂新建、或更新时，作一全盘考虑，将中水回用系统一并纳入。而眼前在既有硬件设施更改不易的情况下，将现有设施处理完毕之放流水，搭配第二段的人工湿地土地处理系统，只要设计适当，安全的再生水将是可以期待的目标。

另以中国大陆为例，自古中原大地就是旱灾频仍地区，而自 1949 年以降，即大力兴修水利工程，发展排灌事业，理论上应具备较强抗旱能力。但从数据上显示，2000 年时中国受旱面积达到 6.08 亿亩，成灾面积有 4 亿亩；而 2008 年入冬以后，耕地受旱面积 2.74 亿亩，作物受旱面积 1.34 亿亩[33]。每年受灾面积虽有不同，但干旱却已成挥之不去的梦魇。

根据毛寿龙与龚虹波[34]在《水资源的制度分析》一文中指出，中国北方地区降水量不多，但不一定会导致旱灾，中国发生旱灾原因的关键在于“浪费水”。中国农业用水占用水总量的 80%以上，浪费水的严重程度与旱灾灾情同样惊人。此点与台湾的状况非常相似。而中国境内共有 86,000 多座的水库，但设计目的多以发电为主，加上近年实行承包制，承包单位着重的是经济效益，在经济放缓、用电需求减少之后，水库只剩下蓄水的功能，因承包单位将水视为经济资源，在不放水的情况下，农业灌溉渠道中也就没有水。另一方面，自 2006 年后，各地政府开始向农民收取水费，水费标准年年攀高，最终导致农民无法自灌溉渠道取水，只能看天吃饭。

人多水少，水资源分布不均，是中国长期以来面临的基本国情，而河流地表水的开发已远远超出各河川的水资源承载能力。地下水年均超抽达 200 多亿立方米，各地纷纷出现河川断流、湖泊萎缩、湿地退化、地层下陷与海水入侵等问题。而旱灾的持续发展，不仅仅是气候变迁的结果，与户口制度合理化、人口朝都市集中，结果用水激增，利用效率低，而且浪费严重亦有莫大关系。

如何因应如此困境，提升用水效率、灌溉排水再生与再利用，将是当下最有效的解决方向。一般来说，农业灌溉用水约占一国水资源消耗量的 75%~90%，农业节水的成效只要达到 10%，其产生的效益就相当于工业或民生大多数用水量。在中国，都市化已是不可逆转的趋势，但都市污水下水道等的基础建设却远远赶不上人口增加的速度，大量生活污水排入河道的结果，污染了河川、水库等水资源，进一步削减了可用水源。

藉由污水下水道、污水处理厂等设施来减少水资源污染，以现实状况来说并不容易。但如果在河道上，以生态工法兴建人工湿地土地处理系统，则是一项快速有效的可行方案，如果能扩展视野，将该等设施赋予多功能思维，例如生态旅游、环境教育等，则所能创造出的将不只是水资源再利用而已。

6. 结论

2009 年 3 月在土耳其伊斯坦堡召开的第五届世界水资源论坛，曾发表宣言指出，全世界正面临快速、前所未见的全球变迁，例如人口成长、迁徙、都市化、气候变迁、沙漠化、干旱、土地侵蚀，以及土地使用、经济与饮食习惯的改变等等。全球水资源的两项重大威胁——“水资源管理不当”与“气候变迁”，只有积极有效的战略规划才有可能解决问题。由于现有的诸多硬件设施并不容易改变，牵涉土地与经费双重难题，使现有的许多工程技术都难以发挥作用，因此，设置在河道上、或特定区域的人工湿地土地处理系统，可以有效因应目前的困境。

在第六届的水资源论坛(2012)的会议中亦曾提及，漫灌技术已经被许多国家采用，有些与会代表更表示，在他们的国家、或地区已有再生水的“商品”，包括：处理农业回归水与工业废水、工业冷却水硝化杀菌、以软性逆渗透方式处理地下水、以逆渗透及超逆渗透方式再生畜牧及养殖用水等，显示再生水执行成果收效良好，确能有效改善灌溉用水质量，并增加地下蓄水层含水量，同时可促使湿地复苏。其成功因素，包括：配合实际需求开发多元质量的再生水、营运操作的确实性及由下而上的决策机制等。在非洲等地的一些开发中国家，则已发展出在他们的废水灌溉农业、小规模灌溉体系，以及在贫穷的都

市地区，如何从废水灌溉农业中，降低健康风险的解决方案[35]。

世界各地的文明与经济发展程度不一，所面临的问题也不一样，但水资源不足却是多数地区已经正在面对的难题，特别是非洲等开发中国家，透过国际组织的协助，实行许多低成本的有效作法，确实值得参考。在用水问题方面，从法制化、创新化、政府有效管理、水资源保育等方向进行评估并形成政策后，就能有效解决。如能更进一步考虑生态旅游与环境教育的需求，藉以提升人民的认识与认同，则以生态工法建构的人工湿地土地处理系统，将是一项最好的选择。寄望未来能有更多的投入，使水资源与环境生态能有更正向的可持续发展。

参考文献 (References)

- [1] (2012) World Population estimates by the US Census Bureau.
<http://www.census.gov/population/international/data/idb/sysmessage.php>
- [2] (2014) Wiki seed of Taiwan knowledge. Historical demography. <http://zh.wikipedia.org/wiki/人口史>
- [3] (2014) NRDC (Natural Resources Defense Council). Environmental Issues.
<http://www.nrdc.org/international/summit/summit3.asp>
- [4] Nielsen, R. (2006) The little green handbook. Picador, New York.
- [5] Liu, S.C., Fu, C., Shiu, C.-J., Chen, J.-P. and Wu, F. (2009) Temperature dependence of global precipitation extremes. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L17702.
- [6] 经济部 (2014) 台湾地区民国 101 年生活用水量统计报告.
- [7] 经济部 (2011) 台湾地区水资源开发纲领计划.
http://hysearch.wra.gov.tw/wra_ext/WaterInfo/wrproj/main/main.htm
- [8] 杨伟甫 (2010) 台湾地区水资源利用现况与未来发展问题，经济部水利署。
- [9] 朱敬平 (2011) 工业区废水厂放流水再生为工业用水之可行性探讨，财团法人中兴工程顾问社环境工程研究中心。
http://www.asip.org.tw/userfiles/file/2013/Hsinchu/100_09_3002.pdf
- [10] He, Q., Jing, W.T. and Wang, Y.T. (1998) Introduction of environmentology. Second Edition, Tsinghua University Press, Beijing.
- [11] 袁又罡, 连万福, 范惠婷, 李宏才, 李樱珠 (2002) 污水土地处理系统在水资源再生上之应用. 第十二届下水道与水环境再生研讨会(论文集), 2002 年 8 月 30 日, 台北(国立台北科技大学), 177-186.
- [12] 欧阳峴晖 (2013) 台湾水环境资源质量变迁与展望. 余纪忠文教基金会.
<http://www.yucc.org.tw/news/column/53f070636c3474b058838cc76e9054c18cea8b8a907782075c55671b>
- [13] Liu, J.J., He, W.S., Tong, C.F. and Wang, W. (2006) Wetland ecology. Higher Education Press.
- [14] Odum, H.T. (1962) Man in the ecosystem. In proceedings Lockwood Conference on the Suburban Forest and Ecology. Bull. Conn. Agr. Station 652. Storrs, 57-75.
- [15] Mitsch, W.J. and Jørgensen, S.E. (1989) Ecological engineering: An introduction to ecotechnology. Wiley, New York.
- [16] Lin, Z.Y. and Qiu, Y.W. (2002) Introduction of ecological engineering methods. Water Environment Research Center, National Taipei University of Technology.
- [17] 袁又罡, 郑荣翰 (2003) 以生态工法构筑土地处理系统在水资源再生上的应用研究. *工程环境特刊*, **11**, 105-117.
- [18] 谢蕙莲, 陈永松, 陈章波 (2001) 挽救海岸湿地——生态工法的应用. *科学月刊*, **7**, 594-599.
- [19] Nguyen, L.M., 2000. Organic matter composition, microbial biomass and microbial activity in gravelbed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters. *Ecological Engineering*, **16**, 199-221.
- [20] 李科德, 胡正嘉 (1995) 芦苇床系统净化污水的机理. *中国环境科学*, **2**, 140-144.
- [21] 袁又罡, 郑荣翰, 施泰安, 黄智敏 (2003) 自然演替下土地处理系统水质净化与植物多样性之研究. 第二十八届废水处理研讨会.
- [22] 袁又罡 (2008) 以微生物演替为指标探讨次生漫灌系统重建后对水质净化效能之影响研究. *科技学刊*, **1**, 1-12.
- [23] Li, J., Yang, X.S. and Peng, Y.Z. (2002) The microorganism and water treatment engineering. Chemical Industry Press, Beijing.
- [24] 王焕校 (2000) 污染生态学. 北京, 高等教育出版社.

- [25] 袁又罡, 范惠婷, 陈建谷, 郭书吟, 郑荣翰 (2003) 土地处理系统中土壤微生物处理锰之研究. 第二十八届废水处理研讨会.
- [26] 袁又罡, 连万福 (2009) 除草剂磷塞对漫灌区中优势植物及土壤中铁、锌释出之影响研究. *科学与工程技术期刊*, **1**, 45-56.
- [27] 袁又罡, 黄妙如 (2009) 收割植物对漫灌区水质净化效能之影响研究. *科学与工程技术学刊*, **2**, 1-6.
- [28] Yuan, Y.K. and Huang, C.M. (2010) Investigation of the water purification efficiency of flood irrigation system by using flora succession as an index. *International Journal of Phytoremediation*, **12**, 279-290.
- [29] Yuan, Y.K., Huang, C.M. and Cheng, J.H. (2011) Investigation of the water purification efficiency of land treatment system by using microbial community as an index. *Desalination and Water Treatment*, **32**, 153-160.
- [30] Wang, W.L., Gao, J.Q., Guo, X., Li, W.C., Tiand, X.Y. and Zhang, R.Q. (2012) Long-term effects and performance of two-stage baffled surface flow constructed wetland treating polluted river. *Ecological Engineering*, **49**, 93-103.
- [31] Gao, J.Q., Wang, W.L., Guo, X., Zhu, S.F., Chen, S.H. and Zhang, R.Q. (2014) Nutrient removal capability and growth characteristics of *Irissibirica* in subsurface vertical flow constructed wetlands in winter. *Ecological Engineering*, **70**, 351-361.
- [32] 李友平, 阮香兰, 吴依芸 (2013) 因应气候变迁水资源政策新愿景. *营建知讯*, **363**, 29-35.
- [33] 田君美 (2009) 从 2009 年中国春旱看水资源问题. *经济前瞻*, **123**, 60-66.
- [34] 毛寿龙, 龚虹波 (2004) 水资源的制度分析. *水利发展研究*, **1**, 8-12.
- [35] 胡忠一, 林国华 (2012) 出席第六届世界水论坛会议出国报告书. 行政院农业委员会.