

海绵城市的生态智慧

专家：成玉宁

编辑：广东省城市规划协会

导读：在广东省2017年度第三期注册城乡规划师继续教育培训班上，东南大学建筑学院景观学系主任成玉宁，以热点话题——“海绵城市”为背景，发表了题为《海绵城市的生态智慧》的授课演讲，通过分析中国自然地理与城市水环境，从城市“旱涝”问题产生机制与城市用水现状两方面进行阐述，说明落实水绿交融的海绵城市生态智慧相关举措的必要性。

前言：城市设计的基本任务在于优化“两态”，一是形态，二是生态。传统的城市设计主要关注城市形态与肌理，随着社会与科学技术的发展，城市设计不再只关注形态，转而逐渐关注生态，生物气候条件和特定的地域自然要素是现代城市设计最为关注的重要核心之一，生态作为重要的因素影响并限制城市设计。生态作为支撑着城市形态系统持续存在的内生动因，故城市设计从形态到生态是其发展的必然趋势。

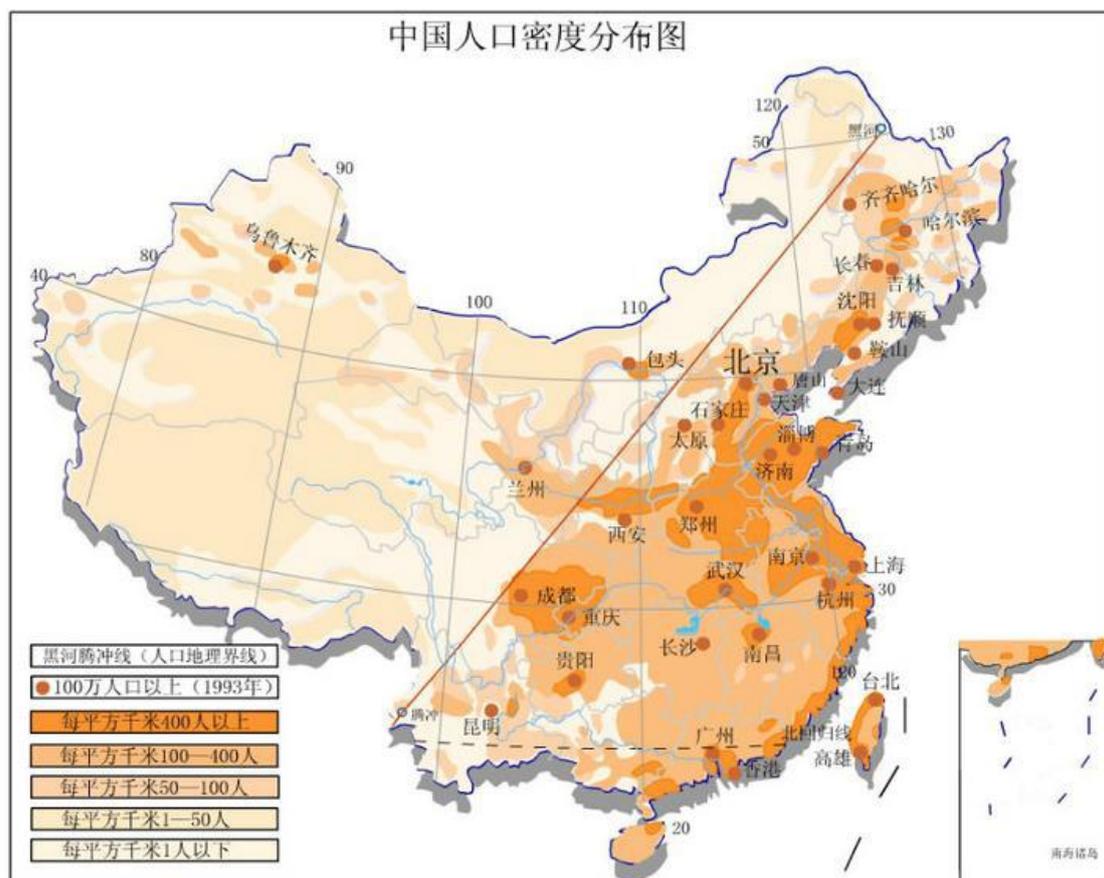
“海绵城市”是人类运用生态智慧统筹解决城市理水问题构想，针对当代城市水环境的特征，深入研究剖析城市旱涝的缘起，以最为集约的方式系统地解决“渗、蓄、滞、净、

用、排”，充分让自然做功，相反相成自两极化解矛盾，从根本上解决城市旱涝问题。海绵城市蕴含着丰富的生态智慧，其要义大约有三：天人合一的认识论，因地制宜的方法论，让自然做功的技术观。

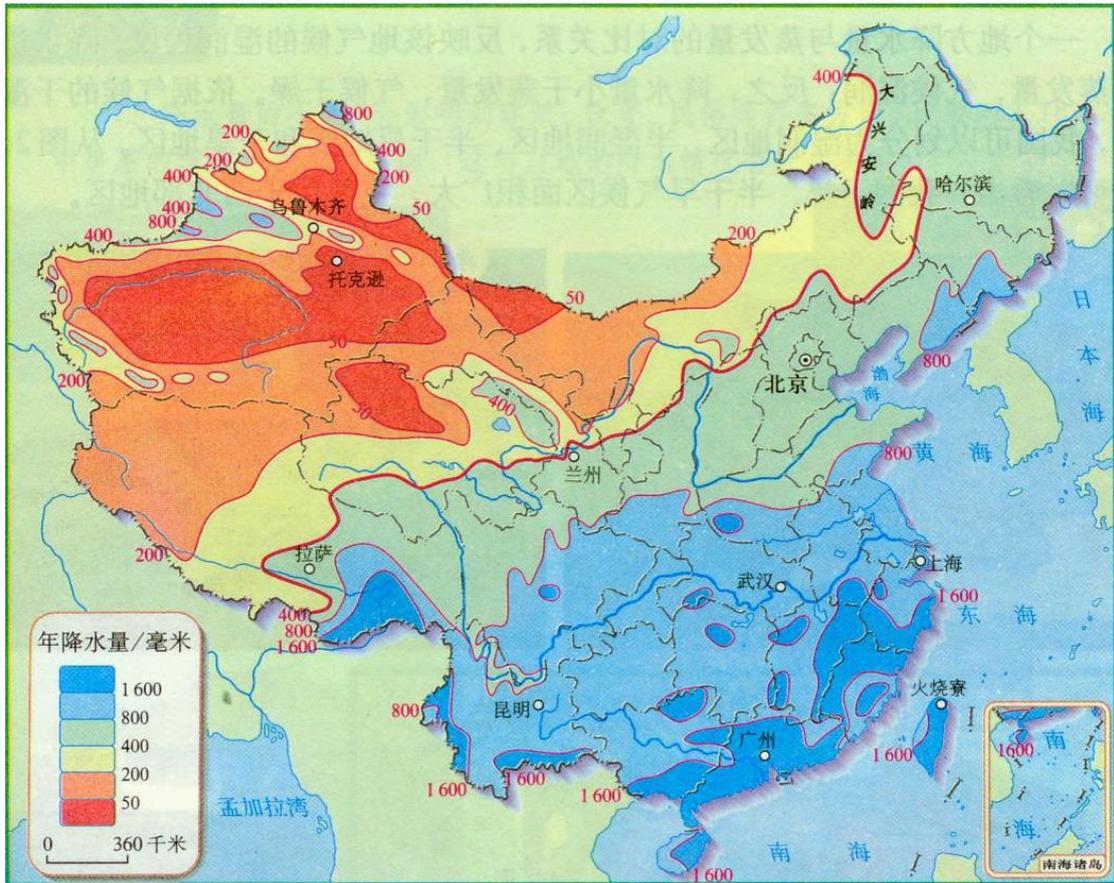
一、中国自然地理与城市水环境

(一) 自然地理与降水

要讲海绵城市，我们首先来看看中国的自然地理和城市水环境。



胡焕庸线示意图，图片来自于成玉宁课件



中国年降水量分布，图片来自于成玉宁课件

图1是胡焕庸线，即“瑗瑋—腾冲”线，是中国人口宜居性的分界线。

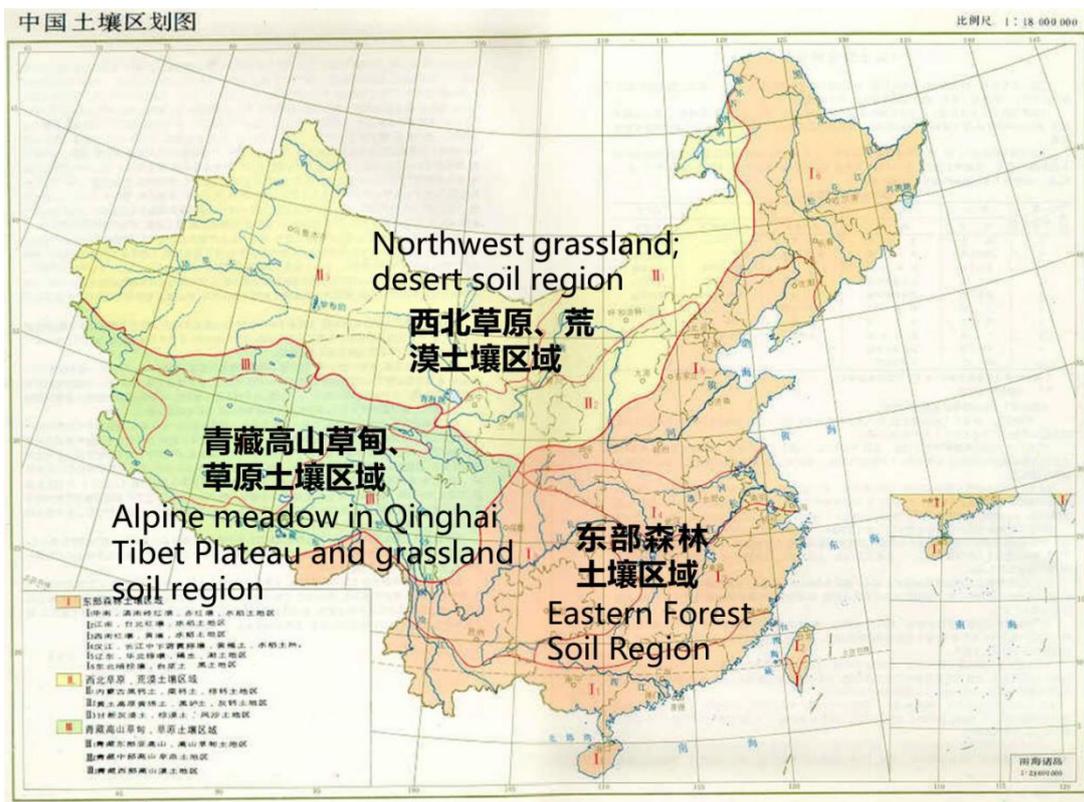
图2显示：中国降水空间分布不均衡，从东南沿海向西北内陆逐渐递减。

可见，胡焕庸线与400mm降雨量线走势基本吻合。自然界的降水分布有其特殊的规律：自然地理与降水之间存在着一定的关联性，这种关联性在地理上呈现明显的降水量的梯度差异。

(二) 城市环境下垫面

1. 中国土壤分布

土壤区域是土壤区划一级单元。它反映我国土纲组合群体结构与大农业生产的概括特征，体现我国生物气候条件大范围的不均衡性。据此，我国分为三个不同的土壤区域：（1）东部森林土壤区域；（2）西北草原、荒漠土壤区域；（3）青藏高原高山草甸、草原土壤区域。



中国土壤区划图，图片来自于成玉宁课件

土壤作为城市绿地的重要组成元素，其类型和理化性质是影响城市绿地的海绵效应优劣的主要因素。土壤类型的划分可按照土壤的质地类型、城市利用类型分类。不同类型的土壤对雨水径流的下渗、蓄积作用不同。土壤的入渗率也与土壤的质地呈反比，土壤质地越轻，土壤的入渗速率越好，

土壤的入渗性能则越好，绿地的海绵效应越强。

不同土壤类型渗透系数
Permeability coefficient of different soil types

土壤类型 Soil Type	下渗系数最小值 Mininum (m/s)	下渗系数最大值 Maximum (m/s)
黏土Clay		6.00E-08
粉质黏土Silty Clay	6.00E-08	1.00E-06
黏质粉土Clay Silt	1.00E-06	6.00E-06
粉砂silt	6.00E-06	1.00E-05
细砂Fine Sand	1.00E-05	6.00E-05
中砂Medium_Dine Sand	6.00E-05	2.00E-04
均质中砂 Homogeneous Medium Sand	4.00E-04	6.00E-04
粗砂Coarse Sand	2.00E-04	6.00E-04
均质粗砂 Homogeneous Coarse Sand	7.00E-04	8.00E-04

不同土壤类型渗透系数，图片来自于成玉宁课件

土壤是海绵城市重点研究要素，正所谓一方水土不但养一方人，更是养育了一方生命。生命对地域土壤具有适应性，不能随意更换、改变其结构。

2. 城市下垫面构成

根据研究目的不同，城市下垫面分类有多种方式，对于城市降雨产流研究，考虑主要因素是渗透性、坡度、糙率等，最基本可分为透水地面和不透水地面两类。

国家生态园林城市标准中要求建成区绿地率 $\geq 35\%$ ，因此即使在达到国家生态园林城市建设标准后，城市建成区仍有近2/3为建筑、道路、广场铺装等不透水下垫面。占比1/3

的城市透水下垫面如何尽量有效的消纳和存储城市不透水表面的径流雨水，是改善城市水环境问题的关键。

(三) 中国城市水环境的变迁

自古城市选址与建设都与水系有着密切联系，如何智慧的处理城市与水的关系是城市兴亡的关键要素。

表 5 黄河、长江全流域不同年代径流变化影响因子分析

流域	时段	变化(mm)	下垫面因素(%)	降水因素(%)	流域	时段	变化(mm)	下垫面因素(%)	降水因素(%)
黄河流域	1970~1979	-505	75	18	长江流域	1970	126	62	36
	1980~1989	-618	86	9		1980	147	70	30
	1990~1989	-670	85	7		1990	251	77	24
	2000~1989	-656	84	8		2000	167	73	26
	平均	-612	83	11		平均	173	71	29

下垫面因素对河流径流变化的影响百分比
Impact percentage of the underlying surface on the river runoffs

河流	70年代	21世纪初
黄河	75%	84%
长江	62%	73%

降水变化和人类活动引起的下垫面变化
Changes on underlying surfaces caused by precipitation changes and human activities

河流	降水变化贡献率	人类活动贡献率
黄河	11%	83%
长江	29%	71%

来源：王雁,丁永建,叶柏生,Fengjing LIU,王杰,王杰. 黄河与长江流域水资源变化原因[J]. 中国科学地球科学,2013,(07):1207-1219.

Speaker: Prof.Cheng Yuning Department of landscape architecture, School of architecture, Southeast University

长江、黄河径流变化影响因子分析，图片来自于成玉宁课件

通过对不同年代黄河、长江全流域降水变化和下垫面变化对径流的影响程度的比较，可以看出人类活动的影响在随时间加强，且在20世纪80年代有明显增强。

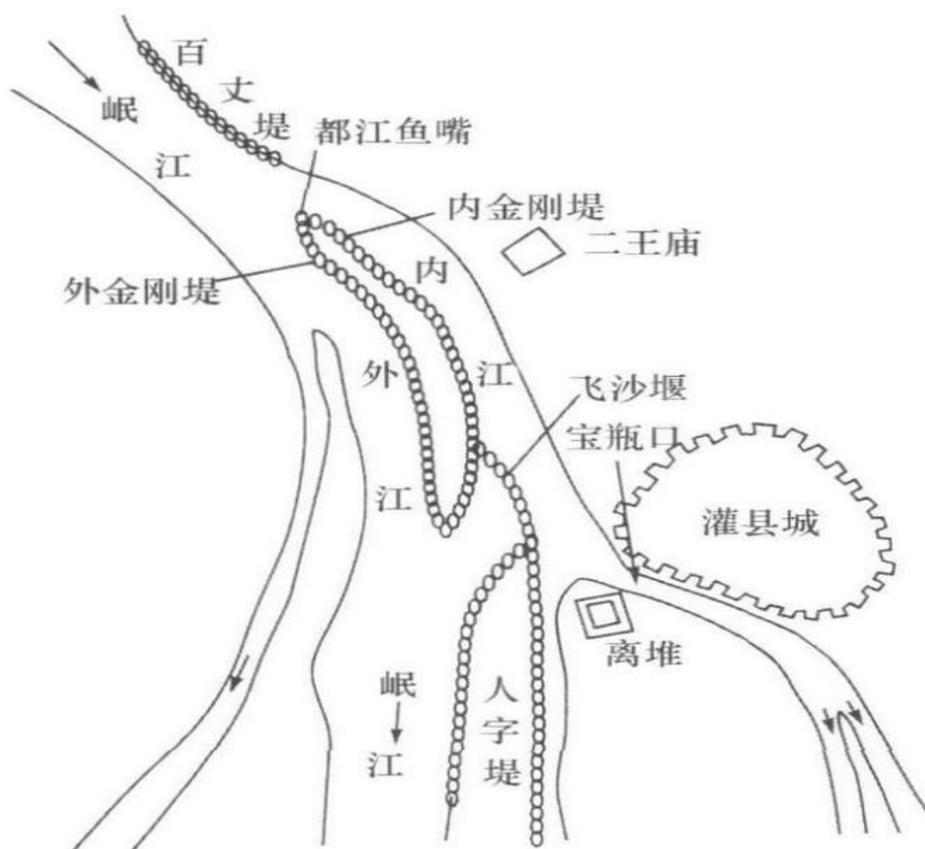
1970—2008年，降水变化和人类活动引起的下垫面变化都引起了黄河流域径流量的减少，其中降水减少的贡献率为11%，人类活动的贡献率为83%，同一时段，长江流域降水减少引起的径流减少占径流量变化的29%，径流量增加的结果71%是由人类活动造成的。

城市在发展的过程中，水环境并没有得到很好地治理，相反，由于人的不恰当的行为活动，没有顺应自然之势，使

得城市水环境变得越来越恶劣。

（四）中国城市传统治水智慧

海绵城市的建设更是“天、地、人”三才的有机统一，不变的是“天”和“地”，而最具智慧的恰恰是“人”。人如何统筹天地资源，是人居环境生态智慧的核心，这是中国人的智慧。



都江堰工程布置示意图，图片来自于成玉宁课件

从四川都江堰、江西赣州福寿沟的构造、利用效果来看，中国人具有丰富的海绵城市的技术，从来不缺少海绵城市的智慧，更不缺少对海绵城市的认知。从城市尺度，可以看到，我国古人懂得充分利用自然的地表水系统、高程、用简单的机械装置以及不同季节水位的变化来滋养园林绿地。

人与自然长期磨合的过程中，找到了与自然和谐共生的方法。所以规划要顺应自然的规律，并巧妙、适度地人为干预；因任自然，不是放任自然；要实现人为的目的，应当顺应自然之“力”和自然之“势”。

（五）城市设计从形态到生态

1. 建成环境

建成环境需要解决的根本问题是从生态到形态的城市设计，而不是就形态论形态，应是以人为中心，且构建包括其他生物物种生存和延续的生态系统。新时期城市规划、城市设计要倡导的是不完全借助人力，而应最大程度利用自然，真正保持城市的物质循环和能量流动，是我们实现城市可持续发展的法宝。

2. 建设环境的生态特征

建设环境的生态特征是什么？建成环境是由自然生物圈与人类文化圈交织而成的复合生态系统。与大尺度的自然生态系统不同，小尺度的建成环境生态系统不稳定，易受人为活动影响。所以，任何规划与设计都是以自然生态为背景，以满足使用要求为目的的人为干预活动。建成环境不可避免的是两种生态系统的叠加：场地固有的生态系统与人为生态系统。所以建成环境中的自然景观要素对于场地生态特征有着决定性的作用。

3. 传统城市规划设计

传统城市规划以物质空间规划为主体，是对人类主要聚居方式的研究，充分利用了特定的城市地貌地形、河面湖水和自然景色，从而形成各自的城市个性。

4. 现代城市设计



马来西亚布城鸟瞰Bird's-eye view from Putrajaya in Malaysia



新加坡花园城市Garden City in Singapore

现代城市设计，图片来自于成玉宁课件

现代城市设计关注的核心话题是两态——“形态”和“生态”。把城市看成自然的重要组成部分，打造城市“形态”与“生态”统一化的有机城市。

5. 有机城市

以人为主导的有机城市思想，是包括建筑、道路交通、给排水、电力电讯、能源的供给、废弃物的输出等一系列城市基本构成要素在内的和谐共生。

以环境为主导的有机城市思想首先是缓解空间开发与自然环境保护之间的矛盾，达到开发利用与保护持续的平衡；其次是为实现现代生活需求与自然环境中资源供给关系的可持续性发展。



有机城市，图片来自于成玉宁课件

人居环境科学

从马来西亚布城——智能型新城和花园城市、德国埃尔兰根、澳大利亚哈利法克斯等生态城市，可见人居环境科学的重要性。

人居环境科学以人与自然的和谐为中心，以人类聚居环境为研究对象。对于人居环境学科而言，生态学的意义不止于解读生态系统及其构成要素之间的关系，而在于运用生态的思维方式、价值观念解决人居环境中的问题。

生态学与人居环境规划设计：（1）基于“经验”认知的传统人居环境规划设计：传统的规划设计仅仅关注“结果”本身的“形态”；（2）“智慧设计”的当代设计人居环境规划设计：可持续的“智慧设计”不能只关注景观表象，更应充分了解其演替的机制与全过程，从而针对不同场地的生态条件特征展开研究，分析环境本身的优劣情况，降低规划设计的或然性。

从“形态的模拟”到“生态的模拟”是从形式到规律的思维方式的转换。“生态”是“形态”的重要依据，自然的

生态形式都有其自身的合理性，是适应自然发生规律的结果；新的形态遵循原初形态的生成规律重新组合而成，符合生命自身的发展规律，可以从根本上解决形态的存在和持续的问题。所以只有形态，没有生态的形态不可持续，有了生态的形态是可持续的生态。所以对生态的机制和过程模拟很重要。

二、城市的“旱涝”问题

(一) 城市的内涝问题

1. 城市旱涝问题的缘起与现状

伴随大规模的城市建设，以城市排水（雨水）和内涝为代表的水安全问题日益凸显。近年来，我国北京、深圳、武汉、杭州、南昌和延安等多个城市频繁出现城市内涝，对城镇居民生活造成了极恶劣的影响。逢雨必涝逐渐演变为我国大中城市的痼疾。

近年来国内城市内涝造成损失及死亡人数统计
Statistics of waterlogging losses and deaths in Chinese cities in recent years

时间	城市	人员财产伤亡情况
2011年6月23日	北京	交通瘫痪，2人死亡
2011年7月3日	成都	2人遇难
2012年7月21日	北京	77人死亡，经济损失116亿
2013年5月15日	厦门	5人死亡，经济损失2500余万
2013年8月30日	深圳	2人死亡，经济损失5000万元
2014年3月31日	深圳	2人死亡，200余处积水内涝
.....		

2008-2010年中国351个城市内涝基本情况
Waterlogging statistics of 351 cities in China in 2008-2010 years

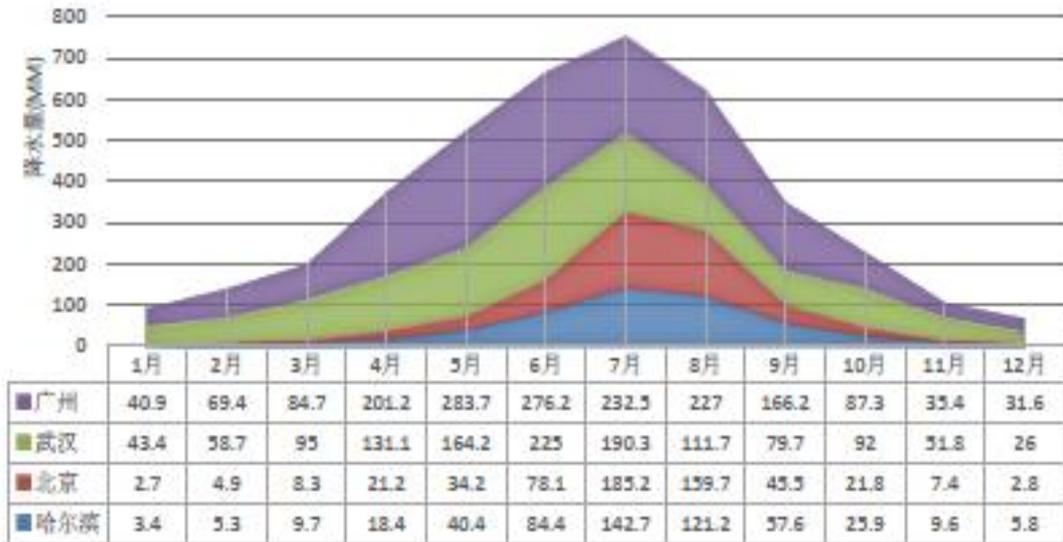
内涝	事件数量 (件)			最大积水深度 (mm)			持续时间(h)			
	1-2	≥3	总计	15-20	≥20	总计	0.5-1	1-12	≥12	总计
城市数量	76	137	213	58	262	320	20	200	57	277
城市比例	22%	40%	62%	16.5%	74.6%	91.1%	5.7%	57.0%	16.2%	78.9%

近年来国内城市内涝基本情况，图片来自于成玉宁课件

2. 中国城市内涝特点

中国城市内涝具有普遍性和频发性、发生时间相对集中、

灾害对象主要是城市交通系统和地下建筑空间等特点。



哈尔滨、北京、武汉、广州每月平均降水量统计，图片来自于成玉宁课件

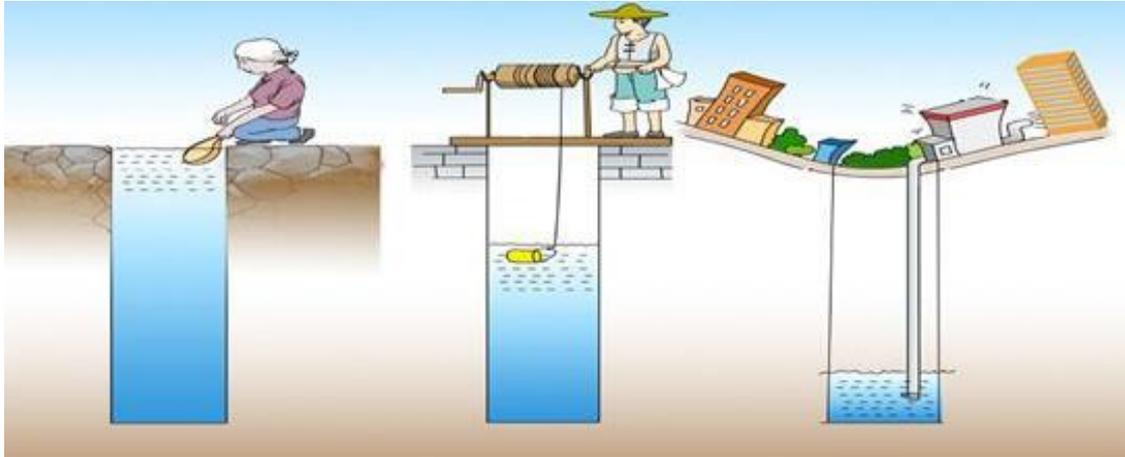
(二) 城市的缺水问题

省份/地区	水资源总量 (亿立方米)	地表水与地下水			人均水资源量 (立方米/人)
		地表水	地下水	地表水与地下水	
北京	20.3	6.5	16.0	2.2	95.1
天津	11.4	8.3	3.7	0.6	76.1
河北	106.2	46.9	69.3	30.1	144.3
山西	111.0	65.2	97.3	51.4	305.1
内蒙古	637.6	397.6	236.3	96.1	2149.9
辽宁	146.9	123.7	82.3	60.1	332.4
吉林	306.0	251.0	120.2	65.2	1112.2
黑龙江	944.3	814.4	295.4	165.5	2463.1
上海	47.1	40.1	10.0	3.0	154.6
江苏	369.3	236.4	118.9	16.0	502.3
浙江	1132.1	1118.2	217.9	2057.3	
安徽	778.5	743.8	178.8	113.3	1295.4
福建	1219.6	1218.4	330.5	329.3	3218.0
江西	1631.8	1613.3	397.2	379.7	3600.6
山东	148.4	76.6	118.9	45.0	152.1
河南	263.4	177.4	166.6	60.9	300.7
湖北	914.3	895	253.6	1574.3	
湖南	1799.4	1799.4	426.2	2680.1	
广东	1716.4	1709.0	411.1	1608.4	
广西	1990.9	1989.6	403.0	4203.3	
海南	363.5	378.7	91.9	4266.0	
重庆	642.6	642.6	121.8	2155.9	
四川	2667.7	2669.5	606.2	3148.5	
贵州	1213.1	1213.1	294.4	3461.1	
云南	1726.6	1726.6	568.4	3673.3	
西藏	4416.3	4416.3	965.1	14020.0	
陕西	361.6	325.8	98.3	932.6	
甘肃	196.4	196.4	104.7	767.0	
青海	792.9	776.0	331.5	13675.5	
宁夏	10.1	8.2	19.4	153.0	
新疆	726.9	696.6	443.9	3166.9	

中国各省份缺水基本情况，图片来自于成玉宁课件

据《2015年中国统计年鉴》显示，中国目前有12个省（和直辖市）人均水资源量低于严重缺水线，其中有9个地区（北京、天津、河北、山西、辽宁、上海、山东、河南、宁夏）

人均水资源低于500立方米，为极度缺水地区。除上海和江苏以外，其他缺水地区均在北方，且主要集中于华北和西北地区。



开采地下水，图片来自于成玉宁课件

城市化的推进导致下垫面的硬化程度随之增加，地下水位逐渐下降而且易受污染，因此如何处理好下垫面与地下水的关系、补充地下水是海绵城市的另一大设计重点。

（三） 城市的水敏问题

城市化发展导致局地气候条件变化引起了城市的缺水问题，而城市水系的破坏导致其蓄水调洪能力下降、2/3城市下垫面硬化效应、现有城市排水规划与管理等则造成了城市旱涝问题。

不同城市间降水、下垫面条件差异巨大，城市水环境也不尽相同，城市水问题显然也不是一种策略、模式能解决的，海绵城市不是单一的解决排水问题、城市雨涝问题，也不是局限于低影响建设与开发，而是关乎到城市的水环境、水资源的综合性的系统命题。

三、城市用水问题

(一) 城市用水情况

地域分区	日用水量 (l/人 •d)	使用范围
第一区	80~135	黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古
第二区	85~140	北京、天津、河北、山东、河南、山西、陕西、宁夏、甘肃
第三区	120~180	上海、江苏、浙江、福建、江西、湖北、湖南、安徽
第四区	150~220	广西、广东、海南
第五区	100~140	重庆、四川、贵州、云南
第六区	75~125	新疆、西藏、青海

注：地域分区原则：我国地域辽阔，地区之间各种自然条件差异甚大。本标准在分区过程中参考了GB50178—93《建筑气候区划标准》，结合行政区划充分考虑地理环境因素，力求在同一区域内的城市经济水平、气象条件、降水多少，能够处于一个基本相同的数量级上，使分区分类具有较强的科学性和可操作性，因此划分成了六个区域。

城市居民生活日用水量标准，图片来自于成玉宁课件

根据上述资料不难发现，城市居民日耗水量随着城市的变大而增加，城市对于水资源具有巨大的需求量。

不同国家典型城市居民生活用水情况也不同，城市居民用水量标准根据城市所在不同区域不同。

(二) 城市园林绿地用水

为保证绿地植被的正常生长，每年需消耗大量水资源，给城市用水带来极大的压力。传统园林中的水体主要是依靠从其周边的天然地表水体引水、开采地下水以及自然降水进行补充。

根据前面的分析，可以发现园林绿化用水对于水质要求并不高。雨水对于植物有着天然的优势，在中国从南至北的城市，若利用好雨水资源，完全可以满足其园林绿化用水需要。

(三) 城市用水供需矛盾

通过分析我国城市生活用水结构发现，公共市政用水量占城市生活用水量的比例一般在20%~50%之间，在大、小城市与南、北城市之间无明显规律可循，不同城市生活用水结构差别也比较大。

我国城市用水的供需矛盾突出，超过一半的城市都存在水资源缺乏的情况。因此针对园林绿化用水情况提出：“分类用水，且充分利用雨水资源”的策略。

四、水绿交融的海绵城市生态智慧

（一）系统论引导的海绵城市

城市绿地与海绵城市的协同作用下，在空间上进行合理的配置，以此构建基于海绵效应的城市绿地系统格局，实现城市的水绿交融。在城市绿地率一定的情况下，绿地的分布形态和结构关系不仅影响着绿地的空间格局，也与绿地海绵效应的发挥呈正相关性。

城市系统由城市绿地系统、城市海绵系统、城市灰色系统共同构成，其中，城市绿地系统与城市海绵系统在城市这一大系统中关系最为密切。

在系统的架构下认识海绵城市，不再是单一的为海绵而海绵，而是通过与城市中不同系统的协同与整合，构建城市水绿格局，从而成为其实现城市可持续发展的重要策略、方法和手段。

基于系统观的海绵城市设计思路

基于系统的观念，统筹城市灰色系统、自然系统和海绵系统协同作用，形成符合城市特定气候地理环境的渗、蓄、净、排、用水体系。海绵系统是城市灰色系统的有效补充而不是替代，综合理解与思考城市水环境问题。

海绵城市不只是关注城市的内涝问题，更多的是关注城市的用水问题、水资源的综合利用。旱涝兼治，协同城市绿地系统，共同构建水绿交融的海绵城市系统，实现城市的水绿交融。

海绵城市理念对待水生态系统保护和雨水资源的最优化利用之生态综合管理思路，体现了其对待城市水生态环境可持续建设管理的思想。水绿交融的海绵城市主要体现在以下三大方面的协同作用，从而优化城市环境：一是客观自然水系，二是绿地系统，三是地下水与下垫面。

（二）因地制宜的设计策略



海绵城市设计策略，图片来自于成玉宁课件

因地制宜是指针对海绵城市系统不同部分提出不同

策略，再结合不同功能的用地属性，实现城市的可持续发展。

因地制宜的设计策略主要通过沟通现有城市水系，将其连成系统，使其与各系统之间协同发挥效能；充分运用城市绿地，将蓄水和用水整合在一起。由于绿地分布本身有均好性，海绵系统与城市绿地的结合可以极大地实现城市绿地的海绵效应；根据城市下垫面和降水的不同来决定海绵技术的运用范畴与适宜技术，是实事求是进行海绵城市实践的根本。

（三）让自然做功的海绵技术

可持续发展观是科学发展观的核心内容，海绵城市的“让自然做功”的技术观在于把城市作为自然的部分，在城市内部用接近自然的水循环模式科学地管理水资源，其目的在于恢复城市与自然的密切联系——即环境可持续观下的海绵城市建设。“以自然规律为基础，依照特征区域自然演替的规律及生境构成特征，营造、重组景观环境，借助自然之“力”，最大限度发挥场所潜能，以实现多重目标的整体价值最优。”

让自然做功的海绵技术分析：1. 雨水有一定的污染，尤其来自城市地表的水，因此以功能为导向，不同功能的水使用不同的水质；2. 减少海绵城市过程中的能耗，使用可再生、循环材料有效施工，使得海绵城市智慧永续。3. 减少管护，在全生命周期内实现免维护，为城市环境提供更高效率的保护。

（四）“渗滞蓄净用排”解读

海绵城市的核心要义在于“渗、滞、蓄、净、用、排”，这也是海绵城市设计方法的理论依据，这六个字分别对应了不同的设计方法，针对不同的场地，综合运用六字统筹下的设计方法：

“渗”——源头减少径流、净化初雨污染；

“滞”——延缓雨水峰值出现时间；

“蓄”——降低峰值流量、为雨水利用创造条件；

“净”——减少污染、改善城市水环境；

“用”——合理利用雨水、提升城市环境品质；

“排”——减少内涝、提升城市应变能力。

（五）海绵城市绩效定量评估

海绵绩效主要包括三大内容：一是地表径流的削减，这是海绵系统的重要考核指标；二是雨水利用率，包括如何使用、使用率、使用过程的能耗量等等；三是对污染物的净化。通过考核地表径流的削减、雨水利用率、污染物净化率三大基本绩效，以此推动三大方面的协同作用，发挥海绵城市的效益。因此海绵城市需要绩效评估。

“海绵城市的生态智慧”是指将人的作为控制在合理有限的范围内，遵循自然的客观规律，解读并模拟自然的机制、过程，最大限度地利用自然之力，在全生命周期内持续地产生综合效益，实现城与水之间的和谐共生。

五、结语

在自然力量与自然竞争面前，人类的历史是真的太短暂了，所以人要自信，但是人不能自大。自然吞噬的力量是无穷的，我相信一切人类文明都是在特定的时空中，都是短暂的，我们要最大程度发挥我们智慧的作用，才能够让我们的环境真正可持续发展。可持续的生态技术、海绵技术是多样的，我们需要坚持不懈地努力，谢谢各位！